

المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

أساسيات الكهرباء

أساسيات الكهرباء

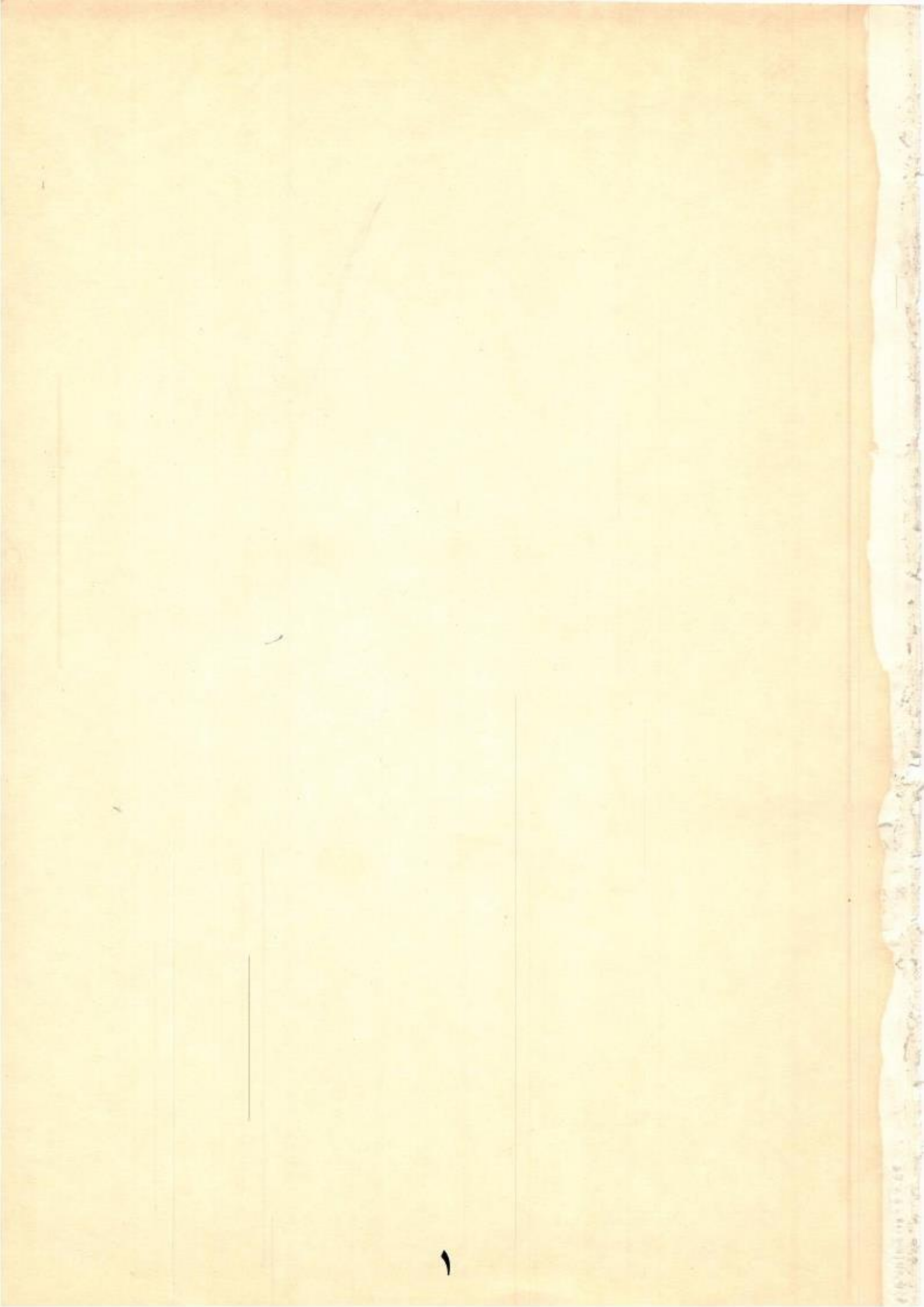
طبع على نفقة المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني - يوزع مجانا ولا يباع



المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

أساسيات الكهرباء

طبع على نفقة المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني - يوزع مجانا ولا يباع





أساسيات الكهرباء

الحمد لله تعالى الذي تتم بنعمه الصالحات

لقد وفقت بتصوير النسخة اسكنر بصورة جديده

وطباعة ممتازة

نسألكم الدعاء بظهر الغيب لي ولوالدي

اخوكم في الله أبو عبد الله عبد المهيمن فوزي

أساسيات الكهرباء

First Printing Arabic Edition 1993

الطبعة الاولى باللغة العربية ١٩٩٣

- Translation and supervision over production & printing was done by (Al - Saif Translation House) by assignment of the General Organization for Technical Education and Vocational Training within the scope of the technical cooperation agreement between the Kingdom of Saudi Arabia and Japan.

- قامت بترجمة الكتاب ومراجعته والاشراف على الاخراج والطباعة دار إلسيف للترجمة بتكليف من المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني في اطار اتفاقية التعاون الفني بين المملكة العربية السعودية واليابان.

٥٣ / ٥٥ أ – أساسيات الكهرباء / ترجمة دار السيف للترجمة
ط١ – الرياض : المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني ١٤١٤ هـ / ١٩٩٤ م .
٤٩٦ص ؛ سم .
ردمك × – ٠٠٤ – ١٢ – ٩٩٦٠
رقم ايداع ١٠٩٣ / ١٤
١ – الكهرباء . أ – دار السيف للترجمة ، مترجم


بسم الله الرحمن الرحيم



فهرست المحتويات

الموضـــوع	صفحـــة

الموضـــوع	صفحـــة

الموضـــوع | صفحـــة

الموضـــوع صفحـــة

الموضـــــوع | صفحـــة

الموضـــوع	صفحـــة

الموضـــوع	صفحـــة

الموضـــوع | صفحـــة

الموضـــوع	صفحـــة

تقـــديم

لقد حدثت عبر التاريخ طفرات واكتشافات علمية ، حققت للانسان سبل ووسائل عيش أيسر في هذه الحياة . ولعل أهم تلك الاكتشافات العلمية ، ما حدث في مجال الكهرباء ، حتى إن الانسان المعاصر أصبح يعتمد في تسيير العديد من شئون حياته اليومية، على الآلات والأجهزة التي تشغل وتدار بالكهرباء ، فانتشرت الكهرباء في المصنع والمزرعة والمدرسة والمنزل ومرافق الحياة الأخرى .

وكتاب " أساسيات الكهرباء " نقدمه بين يديك – أخي الطالب – مسايرة لذلك الركب منوهين في الوقت نفسه ، بالجهد السخي لوكالة اليابان للتعاون الدولي (جايكا) ، حيث قامت بتقديم الكتاب وترجمته من اللغة اليابانية إلى اللغة الانجليزية، في اطار التعاون الفني بين المملكة العربية السعودية واليابان .

وهذا الكتاب يقدم لك " أساسيات الكهرباء " مفاهيمها، دوائرها، رموزها ، ومعادلاتها ، حتى تستطيع أن تقتحم هذا المجال في مستقبل حياتك الدراسية ، وتتعمق في مساقات دراسية لاحقة تستطيع من خلالها سبر غور هذا العلم ، وتقديم ما يمكن أن تساهم به في منظومة البناء ، والتعمير ، والتطوير ، والتشييد ، الذي يشهده هذا البلد .

أسأل الله تعالى لك التوفيق والنجاح ،،

مدير عام التعليم الفني

الدكتور / على بن ناصر الغفيص

الحمد لله تعالى الذي تتم بنعمه

الصالحات

لقد وفقت بتصوير النسخة اسكنر

بصورة جديده وطباعة ممتازة

نسألكم الدعاء بظهر الغيب لي

ولوالدي

اخوكم في الله أبو عبد الله

عبد المهيمن فوزي

مقدمة

تم أعداد هذا الكتاب الدراسى لطلبة أقسام الميكانيكا والكهرباء والالكترونيات وهندسة المعلومات فى المدارس الثانوية الهندسية، والذين سوف يدرسون مادة « أساسيات الكهرباء». والغرض من هذا الكتاب هو تمكين الطلبة من فهم أساسيات الهندسة الكهربائية وتطبيقاتها.

وفيما يلى بعض الملاحظات التى تم مراعاتها في إعداد هذا الكتاب :

(١) نظرًا لإمكانية استخدام الكتاب فى أقسام الميكانيكا والصناعات الكيميائية والأقسام الاخرى بخلاف أقسام الكهرباء فقد روعى وضع المحتويات الاساسية المناسبة للموضوع مع تجنب الشرح النظرى المفصل . وعند الضرورة تتقدم المعالجة الكيفية على المعالجة الكمية .

(٢) تم تصميم الأمثلة الايضاحية والأشكال بحيث تسهم فى فهم النص .

(٣) تم تزويد كل فصل بالأمثلة المحلولة والأسئلة غير المحلوله لتثبيت الفهم والتدريب على العمليات الحسابية .

(٤) للقراءات القصيرة، تم إضافة بعض الموضوعات المهمة مثل السيرة الذاتية لبعض العلماء والشروح والتعريفات للمصطلحات المستخدمة في المجال؛ مثل التوصيلية العالية و المحولات الخاصة .

(٥) تم شرح المبادىء الأساسية للأجهزة والمعدات الكهربائية مثل محرك التيار المستمر والمحول فى فصل «التيار الكهربائي والمغناطيسية» والمحرك الحثى ثلاثى الأوجه، والمحرك الحثى ذو الوجه الواحد في فصل «دائرة التيار المتغير» .

(٦) فى فصل «أساسيات التحكم الالكترونى»، قمنابمعالجة النظرية الأساسية للتحكم، وشرح الحقائق الأساسية عن الأدوات الإلكترونية .

(٧) فى فصل أجهزة القياس الكهربائي يحتوي النص على مبادىء عمل واستخدامات أجهزة القياس الأساسية .

(٨) نظام الوحدات القياسية المستخدم في الكتاب هو النظام العالمي للوحدات SI.

(٩) المصطلحات الفنية تتفق مع كتاب : فهرس المصطلحات الأكاديمية للهندسة الكهربائية، نسخة منقحة من إعداد وزارة التعليم اليابانية والمواصفات الصناعية اليابانية (JIS).

الفصل الأول

دوائر التيار المستمر
DC circuits

يستخدم الكثير منا في حياته اليومية الأجهزة الكهربائية صغيرة القدرة التى تستعين بالبطاريات الجافة كمصدر للتيار المستمر لتغذيتها، ومثال ذلك أجهزة التسجيل المختلفة وماكينات الحلاقة الكهربائية وخلافه. والبطارية الجافة هي مصدر القدرة الذي يسبب مرور تيار مستمر، وتسمى « مصدر قدرة التيار المستمر» . كما تسمى الدوائر الكهربائية التي يغذيها التيار المستمر « دوائر التيار المستمر ». ودراسة أسلوب عمل دوائر التيار المستمر هو الأساس لدراسة غيرها من الدوائر الإلكترونية الأخرى .

حيث إن هناك دوائر إلكترونية مختلفة ، ولكن دائرة التيار المستمر هي القاعدة لجميع الدوائر الكهربائية، لذلك يجدر أن تكون هناك دراسة كافية لدائرة التيار المستمر من أجل دراسة الدوائر الكهربائية الأخرى واستيعاب الظواهر الكهربائية المختلفة .

وفي هذا الفصل سوف نتعرض لعناصر دوائر التيار المستمر من قدرة (P) ، وجهد (V) وتيار (I) ومقاومة (R) . كذلك سندرس قانون أوم الذي يحكم هذه العناصر . وأيضا سوف نتعرض في هذا الفصل لظاهرتي الكهرباء الحرارية والتأثير الكيميائي للتيار الكهربائي.

١ – ١ التيار والجهد الكهربائي Electric current and voltage

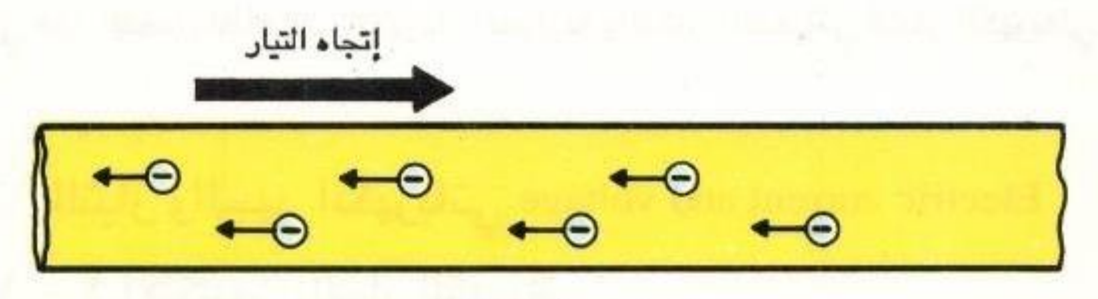
١ – ١ – ١ الإلكترون والتيار الكهربائي

تتكون المادة من ذرات ، وكل ذرة عبارة عن نواة ومجموعة من الإلكترونات تسبح في مدارات مختلفة حول هذه النواة. ويتكون الإلكترون من جسيم ذي شحنة سالبة ، بينما تتكون

النواة من جسيم البروتون ذي الشحنة الموجبة* بالاضافة إلى جسيم النيوترون المتعادل الشحنة. ولكي تكون الذرة متعادلة الشحنة؛ فإن مجموع شحنات الإلكترونات السالبة للذرة تساوي مجموع شحنات البروتونات الموجبة للذرة . وشحنة الإلكترون السالبة تعادل $1.6 X10^{-19}$ كولوم** . والكولوم هو وحدة قياس كمية الكهرباء ، ويرمز له بالرمز C .

إن إلكترونات المدارات الخارجية للذرة تكون أقل التصاقاً بالنواة ، وأكثر حرية للخروج من هذه المدارات أو المسارات المحددة منها . وعند تعرض هذه الإلكترونات لطاقة خارجية قد تخرج عن مساراتها وتسمي إلكترونات حرة .

طبقاً لعطاء المواد للإلكترونات الحرة تنقسم المواد إلى مواد موصلة للكهرباء، ومواد شبه موصلة للكهرباء ، ومواد عازلة *** . إذ أنه عند توصيل قطبي مصدر للجهد المستمر على طرفي مادة موصلة للكهرباء ، طبقاً لطاقة المصدر ومقدار توصيل المادة ، تتحرر كمية من إلكترونات المادة ذات الشحنة السالبة ، وتنجذب نحو قطب المصدر الموجب وتتحد معه ، وفي الوقت نفسه تنبعث هذه الكمية نفسها من الإلكترونات السالبة من القطب السالب للمصدر لتحل محل الإلكترونات الحرة للمادة التي اتحدت مع القطب الموجب للمصدر، وهكذا تنغلق الدائرة ، وتسمى هذه الكمية من الإلكترونات المتحركة باسم التيار المستمر . واتجاه التيار الموجب هو عكس اتجاه سير الإلكترونات السالبة كما هو موضح بالشكل ١-١ .



الشكل ١ – ١ اتجاه سير الإلكترونات واتجاه التيار الموجب

يسمى معدل تدفق الإلكترونات في المادة الموصلة للكهرباء «التيار الكهربائي»، ويقاس بالأمبير، ويرمز له بالرمز (A) ، وهو معدل تدفق شحنة مقدارها واحد كولوم في الثانية الواحدة .

وتعبر العلاقة التالية عن التيار I الناشئ من مرور شحنة مقدارها Q كولوم في زمن مقداره t بين مقطعين من موصل بسرعة منتظمة :

$$I = \frac{Q}{t} \text{ (A)} \qquad (1 - 1)$$

وكما نرى في الشكل ١ - ١ تم تحديد اتجاه التيار بعكس اتجاه سريان الإلكترونات .

وينقسم التيار الكهربائي إلى تيار مستمر (ويرمز له بـ DC)، وتكون كمية سريان الشحنات فيه ثابتة مع الزمن ، وتيار متغير أو متردد (ويرمز له بـ AC) ويتغير فيه سريان الشحنات واتجاهها تغيراً دورياً مع الزمن .

* عند دلك جسم ما فإن ذلك يسمح للجسم بتوليد الكهرباء ، ويسمى الجسيم المسبب للخواص الكهربائية بالشحنة الكهربائية .

** قيمة شحنة الإلكترون على وجه التحديد $1.60217733 \times 10^{-19}$ كولوم.

*** تنقسم الموصلات إلى موصلات معدنية مثل الذهب والفضة والنحاس والألومنيوم وموصلات غير معدنية مثل الكربون والمحلول الإلكتروليتي والأرض وأجسام الحيوانات .

تشمل المواد العازلة على سبيل المثال: المطاط والشحوم الصناعية والأسبستوس والزجاج والرخام والميكا والماء النقي والهواء والسيراميك .

وللحصول على التيار المستمر تستخدم البطاريات الجافة كما تستخدم بطاريات الرصاص الحامضيه للسيارات . أما التيار المتغير فهو الذي يتم توصيله للمنازل .

سؤال١: شحنة كهربائية مقدارها 20 كولوم تمر خلال مقطع موصل لمدة خمس دقائق. كم تبلغ شدة التيار المار في الموصل ؟

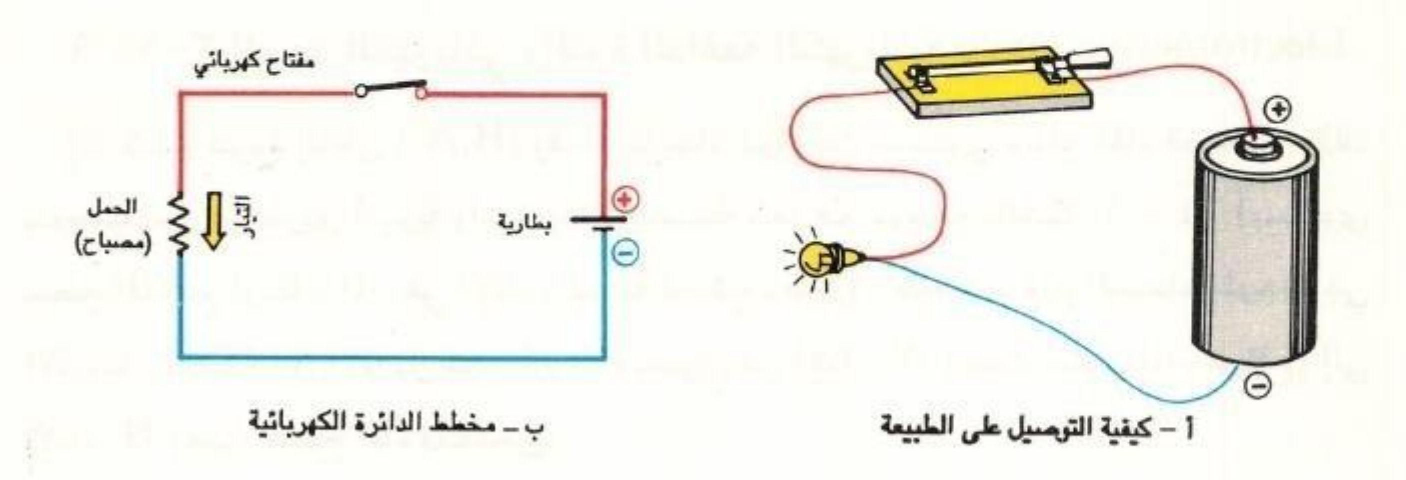
سؤال٢: شدة التيار المار في موصل ما تساوي 2 أمبير .

كم عدد الإلكترونات التي تمر خلال مقطع الموصل في الثانية الواحدة ؟ .

١ – ١ – ٢ الدوائر الكهربائية

إذا أحضرنا بطارية ومصباحاً صغيراً ومفتاحًا كهربائيا وقطعة من السلك ، ثم قمنا بتوصيلها ببعضها البعض كما في الشكل ١ – ٢ (أ) وقمنا بعد ذلك بوضع المفتاح في موضع التشغيل، فإن التيار سيمر في اتجاه السهم من القطب الموجب للبطارية (+) إلى القطب السالب (-) لكي يجعل المصباح الصغير يضيء ويسمى هذا المسار بالدائرة الكهربائية .

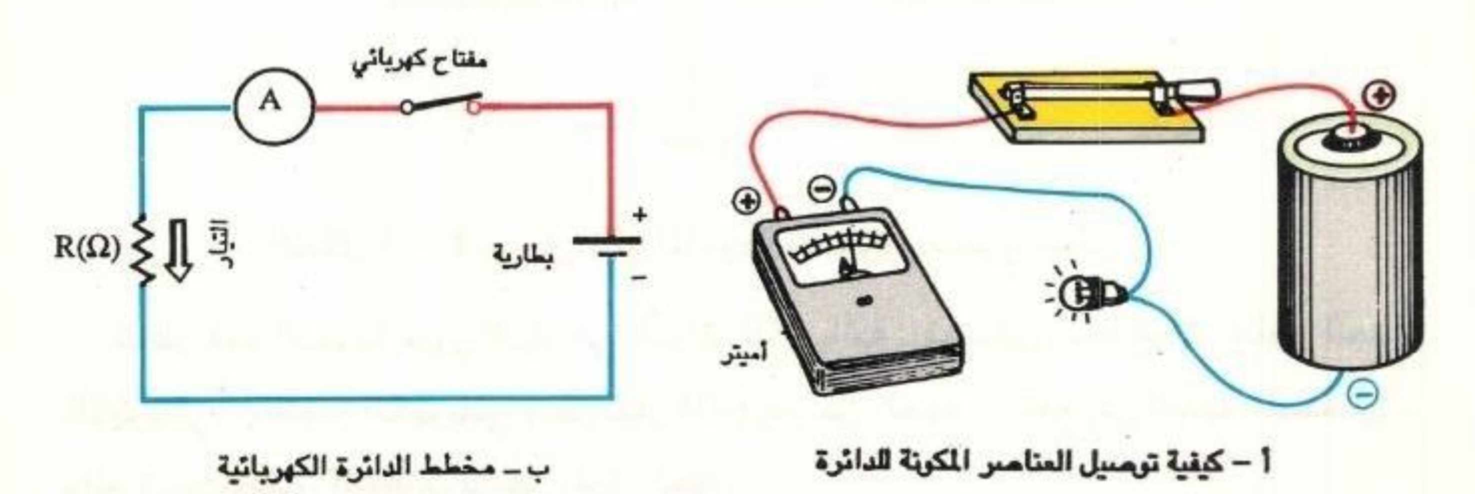
ويوضح الشكل ١ – ٢ (ب) كيفية رسم هذه الدائرة الكهربائية باستخدام رموز كهربائية . ويطلق على مصدر التيار الكهربائي – مثل البطارية – لفظ "مصدر قدرة" . أما الجزء الذي يستهلك الطاقة الكهربائية مثل المصباح الصغير فإنه يسمى الحمل .



الشكل ١ – ٢ الدائرة الكهربائية

في الدائرة السابقة نفسها، إذا أحضرنا أميتر (جهاز لقياس شدة التيار) وقمنا بتوصيله كما في الشكل ١ – ٣ لقياس قيمة التيار المار في هذه الدائرة ، ثم قمنا بتغيير المصباح بمصباح آخر يختلف عنه في القدرة؛ فإننا نلاحظ تغيراً في شدة التيار المار في الدائرة . ويرجع السبب في هذا التغيير إلى تغير قيمة الحمل – أي توصيل حمل آخر للدائرة له مقاومة مختلفة لمرور التيار .

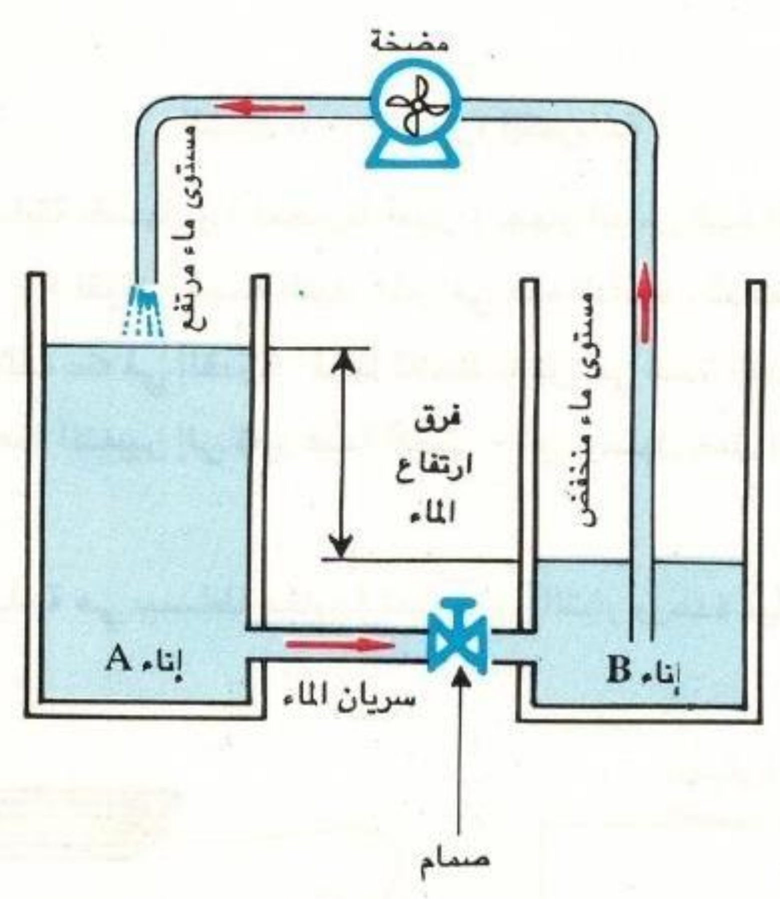
والمقاومة الكهربائية هي ببساطة مقاومة تمنع مرور التيار ووحدة قياسها هي الأوم الذي يرمز له بالرمز Ω .



الشكل ١ – ٣ توصيل جهاز قياس شدة التيار (الأميتر)

١ -١-٣ الجهد الكهربائي والقوة الدافعة الكهربائية Electromotive Force

إذا كـان لدينا إناءان (B,A) وقمنا بإيجاد فرق بين مستوى سطح الماء فيهما، وذلك بتوصيلهما عن طريق أنبوبة واستخدام مضخة كما هو موضح بالشكل ١ - ٤. (مستوى سطح الماء هو ارتفاع الماء في الإناء بالنسبة لسطح معلوم) . فإنه عند فتح الصمام الموجود في الأنبوبة الموصلة بين الإناءين نجد أن الماء يسري من الإناء A (حيث سطح الماء مرتفع) إلى الإناء B (حيث سطح الماء منخفض) .



الشكل ١ - ٤ سريان تيار الماء وعلاقته بفرق مستوى سطح الماء .

تناظر هذه التجربة مرور التيار في الدوائر الكهربائية . فمستوى سطح الماء يناظر الجهد الكهربائي، والتيار الكهربائي (مثل تيار الماء) يمر من الجهد المرتفع إلى الجهد المنخفض . والفرق بين جهدي النقطتين يسمى بفرق الجهد.

أمـا المضخة التي تسبب الفرق بين سطحي الماء في الشكل ١ - ٤ فإنها تناظر البطارية

الموجودة في الشكل ١ – ٣ ، ففي داخل البطارية* يتسبب التفاعل الكيميائي في إيجاد فرق جهد بين الطرفين . وتعرف القوة التي تسبب فرقاً في الجهد بالقوة الدافعة الكهربائية، ويعبر عنها بمقدار فرق الجهد الذي تولده .

يستخدم الفولت لقياس الجهد الكهربائي عند نقطة معينة وكذلك لقياس فرق الجهد بين نقطتين والقوة الدافعة الكهربائية . وهو وحدة قياس يرمز لها بالرمز (V) **.

فإذا كان لدينا مقاومه مقدارها 1 أوم وقمنا بتوصيل طرفيها بفرق جهد مقداره 1فولت فإن التيار المار في هذه الحالة تكون قيمته 1 أمبير .

وعلى هذا فإن فرق الجهد والتيار لهما وحدات فولت [V] وأمبير [A] على الترتيب كما سبق دراسته في البند السابق . وبالإضافة لهذه الوحدات فإن القيم الكبيره مثل (10^{+3}) فولت أو الصغيرة مثل (10^{-3}) أمبير تجعلنا نضيف اختصارات مثل كيلو (10^{+3}) أو مللي (10^{-3}) لوحدات القياس الاساسية فتصبح مثلاً 1 كيلو فولت [kV] أو1 مللي أمبير [mA] . ويوضح الجدول ١ – ١ وحدات قياس كل من الجهد والتيار .

الكمية	وحدة القياس	رمز الوحدة	العلاقة بين الوحدات
الجهد	كيلو فولت	kV	$1\ kV = 1000V = 10^3V$
	فولت	V	
	مللي فولت	mV	$1mV = \frac{1}{1000}V = 10^{-3}V$
	ميكرو فولت	µV	$1\mu V = \frac{1}{1000\,000}V = 10^{-6}V$
التيار	امبير	A	
	مللي امبير	mA	$1mA = \frac{1}{1000}A = 10^{-3}A$
	ميكرو امبير	µA	$1\mu A = \frac{1}{1000\,000}A = 10^{-6}A$

الجدول ١ – ١ وحدات قياس الجهد والتيار

سؤال ٣

حَوِّلْ الكميات الآتية إلى الوحدات الموجودة بين الأقواس :

(١) 300 مللي أمبير	(A)
(٢) 5 كيلو فولت	(V)
(٣) 100 ميكرو أمبير	(mA)
(٤) 0.8 فولت	(mV)

* سيتم دراسة البطاريات بالتفصيل فيما بعد

** 1 فولت : يكافئ شغل مقداره 1 جول تبذله شحنة مقدارها 1 كولوم (سيتم دراسته بالتفصيل فيما بعد)

١ – ٢ حسابات دوائر التيار المستمر

١ – ٢ – ١ قانون أوم Ohm's law

عندما يوجد فرق جهد بين طرفي مقاومة فإن ذلك يسبب مرور تيار – وقد أوجد چورچ سيمون أوم العلاقة بين فرق الجهد وشدة التيار وقيمة المقاومة .

چورچ سيمون أوم (١٧٨٧ – ١٨٥٤م)

عالم فيزياء ألماني كان والده صانع مفاتيح ، وقد تعلم الرياضيات من والده في سن مبكر . وكان يعيش حياة فقيرة أثناء عصر الثورة الصناعية التي غيرت مجتمعه تماماً . وقد أثبت القانون المعروف باسمه (قانون أوم) في عام ١٨٢٦ ، ونشر كتاباً يشرح فيه

الموضوع بالتفصيل . ولكن المجتمع الأكاديمي الألماني رفض قبول اكتشاف النظرية في هذا الوقت . وفيما بعد أعيد نشر كتابه في أماكن كثيرة خارج ألمانيا منها إنجلترا على سبيل المثال ، ونال العديد من الجوائز بسبب هذا الإنجاز القيم . وفي النهاية حصل على التقدير المناسب في مسقط رأسه وعُين عميداً للكلية الفنية بنورنبرج، ثم عمل أستاذاً في جامعة ميونيخ في سن الستين .

وقد سميت وحدة قياس المقاومة بالأوم (Ω) نسبة إلى هذا العالم الكبير .

اذا كانت المقاومة الموجودة في الشكل ١ – ٥ ثابته وقيمتها $R\ (\Omega)$ ثم قمنا بتغيير فرق الجهد $V(V)$ بواسطة ريوستات منزلقة فإننا نجد أن التيار الكهربائي $I\ (A)$ يتناسب طردياً مع قيمة فرق الجهد .

هذه العلاقة تعرف بقانون أوم، وتعبر عنها المعادلة الآتية :

$$I = \frac{V}{R} \ (A) \qquad (1\text{-}2)$$

ويمكن أيضاً كتابة هذه المعادلة على الصورة :

$$R = V/I\ (\Omega) \qquad \& \qquad V = RI\ (V) \qquad (1\text{-}3)$$

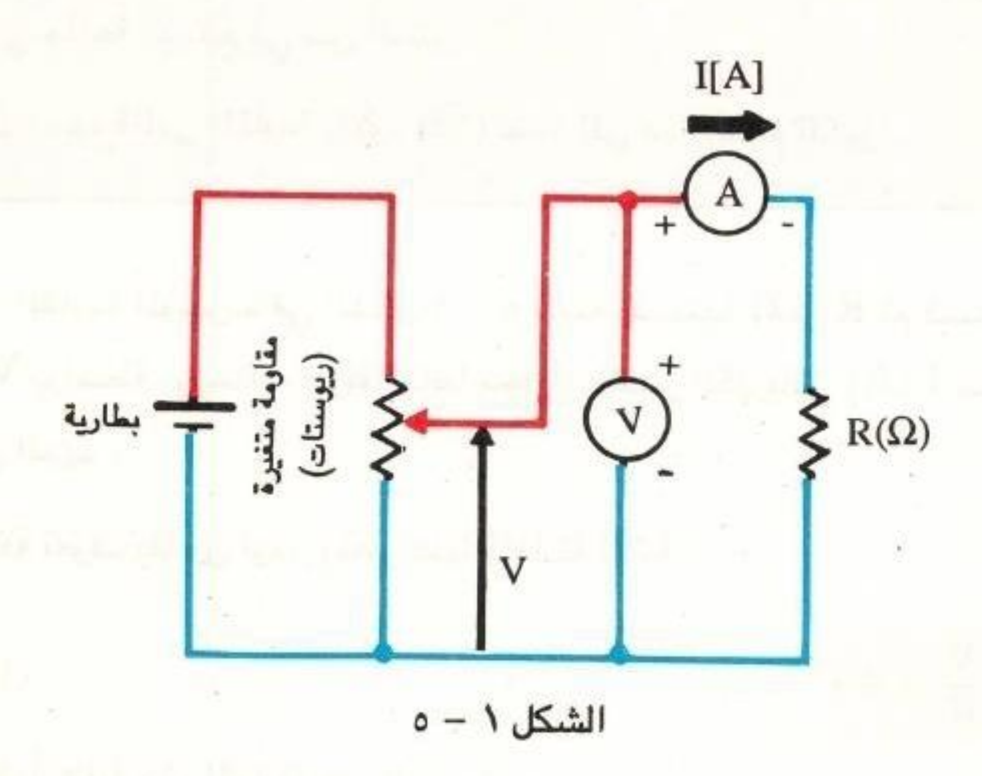
ويمكن أيضاً كتابتها على الصورة:

$I=GV$ حيث $G=1/R$

وتسمى G التوصيلية الكهربائية، ووحدة قياسها السيمنز ويرمز لها بالرمز (S) . وهي كمية تعبر عن مدى سهولة سريان التيار .

سؤال ٤

عند توصيل مصباح صغير مع بطارية فرق الجهد بين طرفيها 1.5 فولت يمر تيار قيمة 300 مللي أمبير. أحسب قيمة المقاومة عند إضاءة المصباح؟



الشكل ١ – ٥

سؤال ٥

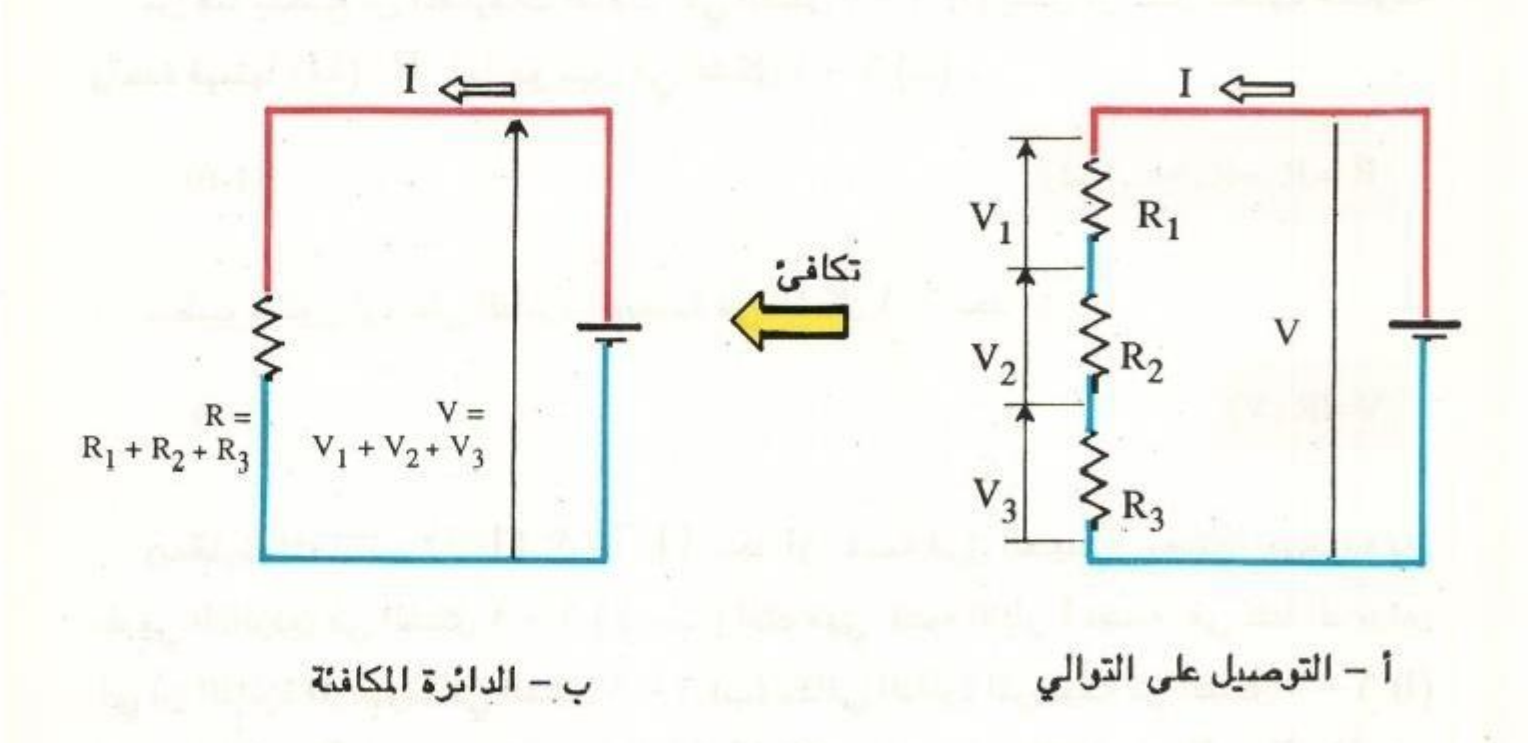
مقاومة قيمتها 5 أوم متصلة مع بطارية فرق الجهد بين طرفيها 3 فولت. احسب قيمة التيار المار بالمللي أمبير .

سؤال ٦

مقاومة قيمتها 15 أوم يمر فيها تيار شدته 8 أمبير. احسب فرق الجهد بين طرفي المقاومة.

أ – توصيل المقاومات على التوالي Series connection of resistors

التوصيل على التوالي – كما هو مبين في الشكل ١ – ٦ (أ) هو أسلوب توصيل تكون فيه المقاومات كلها في صف واحد . وعند التوصيل على التوالي يمر التيار نفسه في جميع المقاومات دون تغيير .



ب – الدائرة المكافئة

أ – التوصيل على التوالي

الشكل ١ – ٦ توصيل المقاومات على التوالي

من هنا نجد أن فرق الجهد V (V) الموجود بين نهايتي المقاومات الثلاثة R_1 , R_2 , R_3 ينتج عنه مرور تيار قيمته I (A) . أما فروق الجهد بين طرفي كل مقاومة على حدة فيمكن حسابها من قانون أوم كما يلي :

$$V_1 = IR_1(V) \ \& \ V_2 = IR_2 \ (V) \ \& \ V_3 = IR_3(V) \qquad (1\text{-}4)$$

ويكون مجموع فروق الجهد الثلاثة V_1 , V_2 , V_3 مساويًا لفرق جهد مصدر القدرة V، ومن هنا نحصل على هذه المعادلة :

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = R_1 I + R_2 I + R_3 I = (R_1 + R_2 + R_3) I \qquad (1-5)$$

من هنا يتضح أن المقاومات الثلاث في الشكل ١ – ٦ (أ) يمكن أن تحل محلها مقاومة واحدة قيمتها (Ω) R كما هو مبين في الشكل ١ – ٦ (ب) .

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \, (\Omega) \qquad (1-6)$$

بتطبيق قانون أوم على الدائرة الموجودة في الشكل ١–٦ نجد أن :

$$V = IR \, (V) \qquad (1-7)$$

وبمقارنة المعادلتين (1-5) & (1-7) نجد أن قيمة فرق الجهد V نفسها موجودة بين طرفي الدائرتين في الشكل ١ – ٦ (أ ، ب) لذلك فهي قيمة التيار I نفسه في كلتا الدائرتين أي أن الدائرة المرسومة في الشكل ١ – ٦ (ب) تكافئ الدائرة المرسومة في الشكل ١ – ٦ (أ) والمقاومة (Ω) R المحسوبه في المعادلة (1-6) تكافئ المقاومات الثلاث R_3, R_2, R_1 في حالة التوصيل على التوالي .

لذلك يمكن حساب شدة التيار I (أمبير) المار في الدائرة من المعادلة التالية (والمستنتجه من المعادلة (1 – 5)

$$I = \frac{V}{R_1 + R_2 + R_3} (A) \qquad (1-8)$$

سؤال٧

بفرض أن قيم المقاومات في الشكل ١ - ٦ (أ) كانت كالآتي :

$R_1 = 10\ \Omega \qquad R_2 = 30\ \Omega \qquad R_3 = 40\ \Omega$

وأن فرق الجهد هو $V = 100\ (V)$

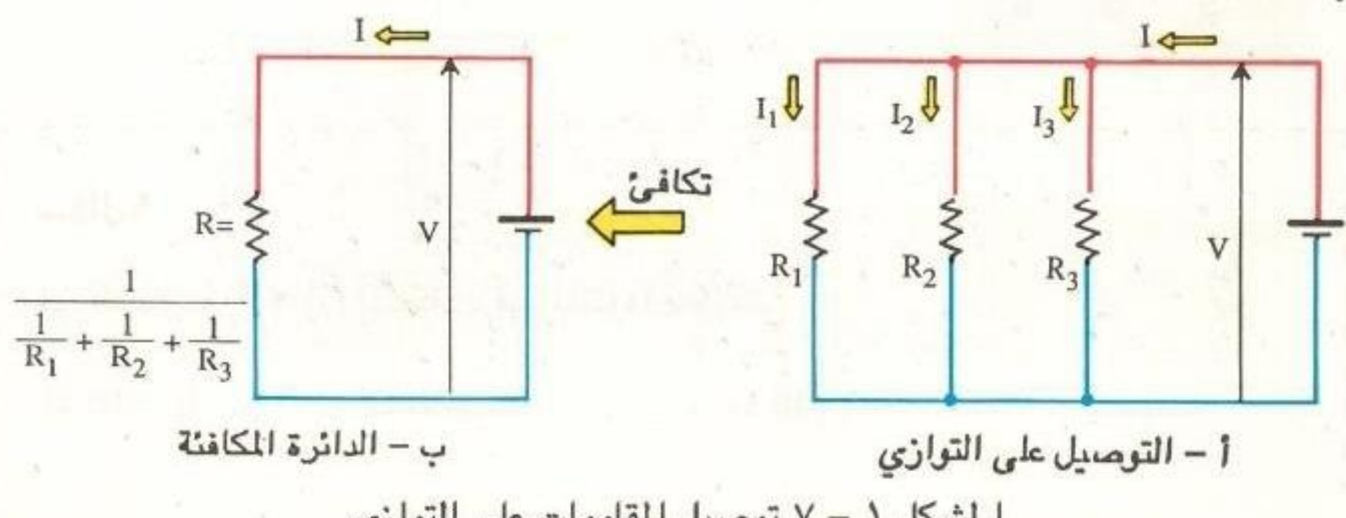
احسب المقاومة المكافئة وشدة التيار المار في الدائرة ؛ وكذلك فروق الجهد V_1, V_2, V_3 بين طرفي كل مقاومة .

سؤال٨

اذا كان فرق الجهد بين طرفي مقاومة هو 3 فولت، وشدة التيار المار بها 200 مللي أمبير. احسب قيمة المقاومة .

ب - توصيل المقاومات على التوازي Parallel connection of resistors

عند توصيل المقاومات على التوازي يتم توصيل طرفي كل مقاومه ببعضها كما هو مبين بالشكل ١ - ٧ .



أ - التوصيل على التوازي

ب - الدائرة المكافئة

الشكل ١ - ٧ توصيل المقاومات على التوازي

عند وضع طرفي المقاومات المتصلة على التوازي بين نقطتين فرق الجهد بينهما V فولت، ينشأ تيار مقداره I_1 أمبير في المقاومة الأولى ، I_2 أمبير في الثانية ، I_3 أمبير في الثالثة. في حين يكون فرق الجهد بين طرفي كل مقاومة متساوي V فولت للمقاومات الثلاثة .

لهذا يمكن إيجاد قيم التيارات I_1 , I_2 , I_3 من قانون أوم بالمعادلة التاليه :

$$I_1 = \frac{V}{R_1}(A) \qquad I_2 = \frac{V}{R_2}(A) \qquad I_3 = \frac{V}{R_3}(A) \qquad (1\text{-}9)$$

ونلاحظ أن التيار I قد انقسم إلى ثلاثة أجزاء I_1 , I_2 , I_3 ويوضح الشكل ١ – ٧ (ب) الدائرة المكافئة للدائرة المرسومة في الشكل ١ – ٧ (أ) ويمكن أن نستنتج منه العلاقه التالية :

$$I=I_1+I_2+I_3=\frac{V}{R_1}+\frac{V}{R_2}+\frac{V}{R_3}=\{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}\}V=\frac{V}{R}(A) \qquad (1\text{-}10)$$

ومنها نحصل على المقاومة المركبة $R[\Omega]$ المكونة من $[\Omega]$ R_1، $[\Omega]$ R_2، $[\Omega]$ R_3 والموصلة على التوازى وفق المعادلة التالية :-

$$R=\frac{1}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}} \qquad (1 - 11)$$

سؤال ٩

في الشكل ١ – ٧ (أ) إذا كانت قيم المقاومات كالآتي :

$R_3=10\ \Omega$ $R_2=20\ \Omega$ $R_1=40\ \Omega$

وكان فرق الجهد بين قطبي البطارية $V=100(V)$. احسب التيار المار في كل مقاومة I_1 , I_2 , I_3 والمقاومة المكافئة R بالأوم .

سؤال ١٠

في الشكل ١ – ٧ (أ) إذا كانت شدة التيار تساوي 15 أمبير وقيم المقاومات كالآتي :

$R_1 = 2\ \Omega \qquad R_2 = 3\ \Omega \qquad R_3 = 6\ \Omega$

احسب فرق الجهد بين طرفي البطارية والتيار الكلي المار في المقاومات .

سؤال ١١

اثبت أنه عند توصيل مقاومتين R_1,R_2 على التوازي تكون قيمة المقاومة المكافئة R هي :

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

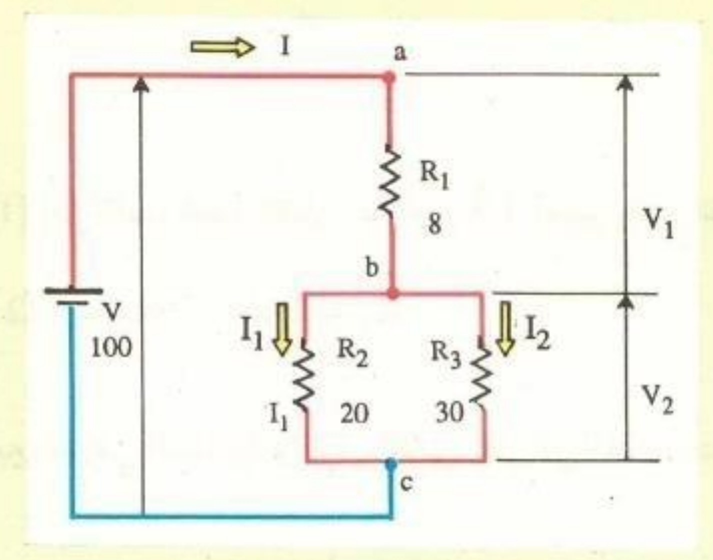
حـ – التوصيل على التوازي والتوالي معاً

في الدوائر الكهربائية يتم المزج بين التوصيل على التوالي والتوصيل على التوازي بطرق مختلفة .

وعند حل مثل هذه الدوائر يكون من المناسب أن نوجد المقاومة المكافئة للمقاومات المتصلة على التوازي أولاً .

مثال١

احسب قيم كل من $V_2 , V_1 , I_2 , I_1 , I$ في الدائرة المبينة بالشكل ١ – ٨



الشكل ١ – ٨ المزج بين التوالي والتوازي

الحـل

لحساب المقاومة المكافئة بين النقطتين c&b نستخدم العلاقة الآتية :

$$R_{bc}=\frac{R_2R_3}{R_2+R_3}=\frac{20x30}{20+30}=12\ \ \Omega$$

وبالتالي تكون المقاومة المكافئة بين c&a كما يلي :

$$R_{ac}=R_1+R_{bc}=8+12=20\ \Omega$$

وتكون قيمة التيار I (بالأمبير) المار في الدائرة هي :

$$I=\frac{V}{R_{ac}}=\frac{100}{20}=5(A)$$

ومنها نحسب قيم فروق الجهد V_2, V_1 باستخدام العلاقة الآتية [المستنتجة من المعادلة (1-4)]

$$V_1=R_1I=8x5=40(V) \ \& \ V_2=R_{bc}I=12x5=60\ (V)$$

ثم نحسب قيم التيارين I_2 , I_1 من قانون أوم :

$$I_1=\frac{V_2}{R_2}=\frac{60}{20}=3(A)\ ,\ I_2=\frac{V_2}{R_3}=\frac{60}{30}=2(A)$$

سؤال١٢

في الشكل ١ – ٨ اذا كان التيار I يساوي 10 أمبير ، احسب كلاً من I_1 , I_2 V_1 , V_2 وكذلك فرق الجهد بين قطبي البطارية V .

د – توصيل البطارية والدائره المكافئة لها

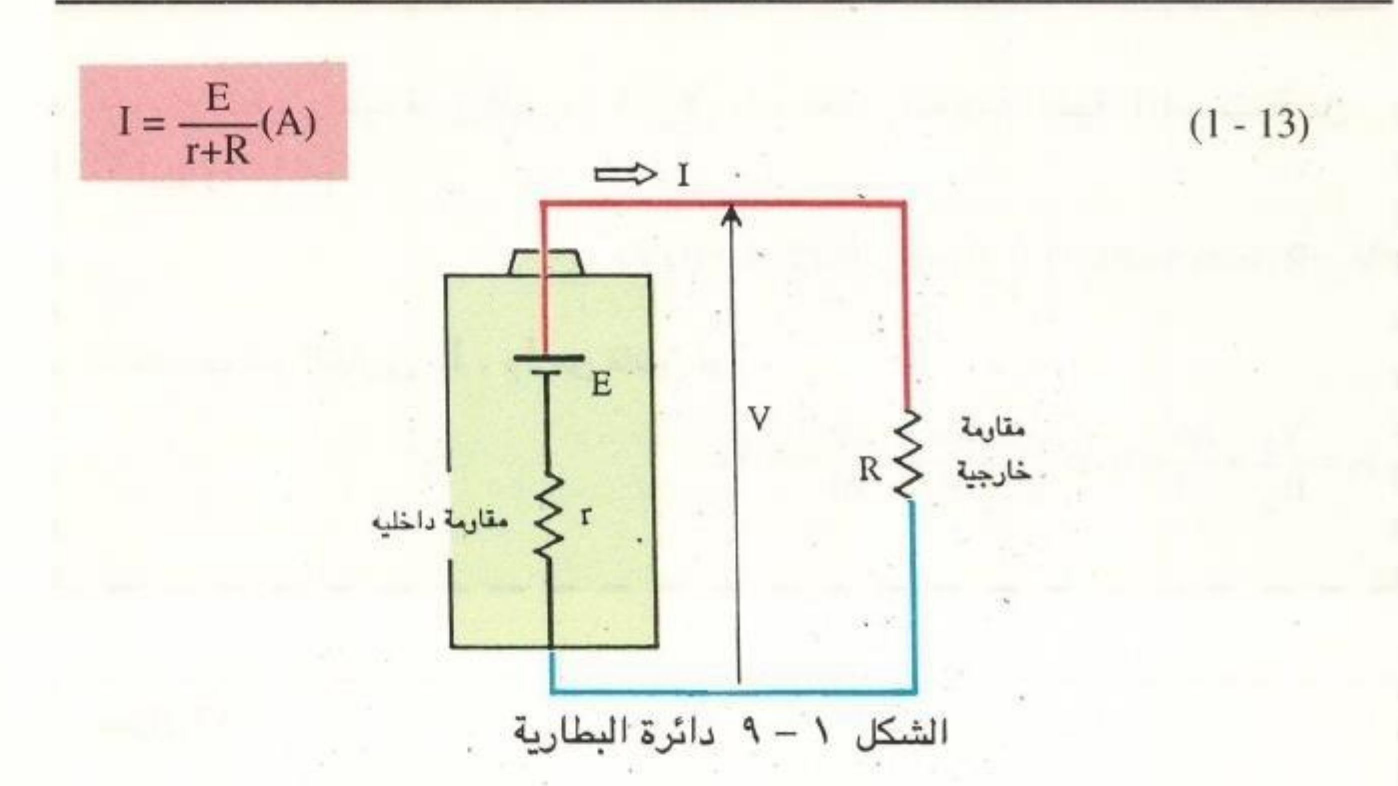
يوضح الشكل ١ – ٩ المقاومة الداخلية للبطارية ، ولحساب هذه المقاومة ، نفرض أن قيمتها تساوي r أوم، وأن التيار الكلي المار في الدائرة يساوي I أمبير فيصبح فرق الجهد بين قطبي البطارية مقداره V فولت ، وهو أقل من القوة الدافعة الكهربائية للبطازية (وقيمتها E فولت) بقيمة مقدارها (rI)

لذلك يمكن التعبير عن العلاقة بين القوة الدافعة الكهربائية (E) وفرق الجهد بين قطبي البطارية (V) بالمعادلة :

$$V = E - rI\ (V) \qquad (1 - 12)$$

ومن ثم يحسب التيار المار في الدائرة بالعلاقة التالية على اعتبار أن $V = IR$ ،

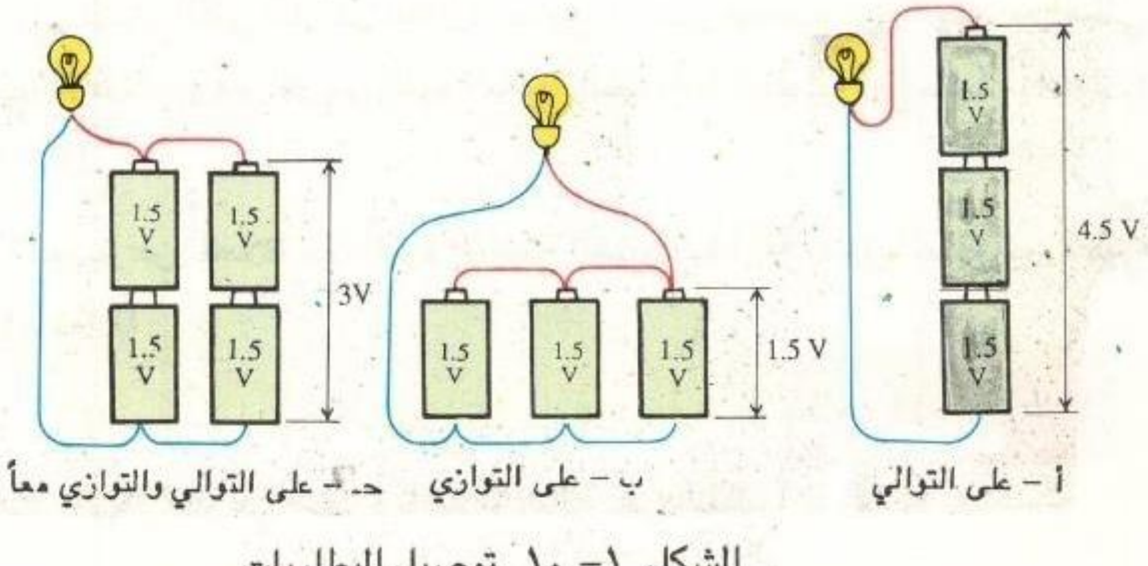
$$I = \frac{E}{r+R}(A) \qquad (1 - 13)$$



الشكل ١ – ٩ دائرة البطارية

عند توصيل البطاريات تستخدم طرق التوصيل على التوالي، أو على التوازى، أو مزيج من الطريقتين ، كما في الشكل ١ – ١٠

ولكن يجب ملاحظة أن توصيل بطاريات مختلفة على التوازي يؤدي إلى سريان مستمر للتيار بين البطاريات طبقاً لفرق الجهد بينها مما يؤدي إلى سرعة استهلاك البطارية .



الشكل ١– ١٠ توصيل البطاريات

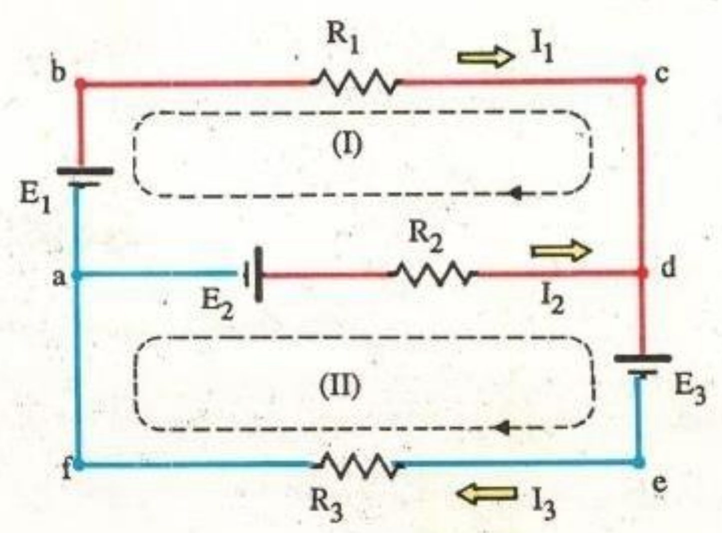
سؤال ١٣

مقاومة خارجية مقدارها 4.9 أوم تتصل ببطارية ذات قوة دافعة كهربائية مقدارها 1.5 ڤولت، ومقاومة داخلية مقدارها 0.1 أوم . احسب قيمة التيار المار فى الدائرة وفرق الجهد بين قطبى البطارية .

في الدائرة نفسها إذا زاد عدد البطاريات إلى ثلاثة بطاريات (من النوع نفسه) متصلة على التوالي. احسب التيار المار في الدائرة، وفرق الجهد بين طرفى المقاومة الخارجية فى هذه الحالة .

١ - ٢ - ٢ الدوائر الكهربائية المركبة Complex electric circuits

فيما سبق تكلمنا عن دائرة كهربائية بسيطة تتكون من مصدر كهربائي يتصل مباشرة بالحمل؛ أما في الدوائر المركبة مثل الشبكة في توصيلها فهي أساسًا تتكون من مجموعة من الدوائر البسيطة بينها علاقات مختلفة ، وينتج عن ذلك صعوبة في حل الدائرة (إيجاد الجهد عند كل نقطة والتيار في كل فرع) إذا استخدمنا قانون أوم فقط . ولذا في مثل هذه الحالة يستخدم قانون كيرشوف في الحل .



الشكل ١ - ١١ مثال لدائرة كهربائية مركبة

أ – القانون الأول لكيرشوف Kirchoff's First law

وهو يتعلق أساساً بالتيار الكهربائى ومنطوقه كالآتي :

" مجموع التيارات الداخلة في نقطة ما في الدائرة الكهربائية يساوى مجموع التيارات الخارجة من النقطة نفسها " .

على سبيل المثال : في النقطة d في الشكل ١ – ١١ نجد أن التيارين I_2, I_1 داخلان في النقطة d والتيار I_3 خارج منها. لهذا تبين المعادلة التالية العلاقة بين التيارات الكهربائية الموجودة عند النقطة " d " .

$$I_1 + I_2 = I_3 \qquad (1 - 14)$$

وباعتبار أن التيار الداخل في النقطة d له إشارة موجبة والخارج له إشارة سالبة (على سبيل المثال) .

نستنتج أن :

" مجموع التيارات الداخلة في نقطة ما يساوى صفراً "

$$I_1 + I_2 + (-I_3) = \text{Zero} \qquad (1 - 15)$$

ب – القانون الثانى لكيرشوف

وهو يتعلق أساساً بفرق الجهد ومنطوقه كالآتي :

" بالنسبة لأي مسار مغلق في دائرة كهربائية : إذا بدأنا من نقطة معينة وتحركنا في اتجاه ثابت يكون مجموع القوى الدافعة الكهربائية في كل جزء من المسار مساوياً لمجموع فروق الجهود على الأحمال الموجودة في الدائرة " .

على سبيل المثال : في الشكل ١ – ١١ اذا كان I , II هما مساران مغلقان بحيث تكون اتجاهات التيارات المارة فيهما كما هو مبين بالرسم، يكون اتجاه القوى الدافعة الكهربائية أو فروق الجهد التي تتفق مع اتجاه السهم موجباً والتى تختلف معه سالباً . طبقاً لذلك يمكن كتابة المعادلة التالية بالنسبة للمسار المغلق I :

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 = E_1 - E_2 \qquad (1-16)$$

ومن هذه المعادلة نجد أن فرق الجهد I_2R_2 والقوة الكهربائية E_2 لهما إشارة سالبة لأن اتجاه I_2 ، و اتجاه E_2 (من القطب السالب إلى الموجب) مخالفًا لاتجاه السهم .

أما بالنسبة للمسار المغلق II يمكن كتابة المعادلة :

$$R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_2 - E_3 \qquad (1-17)$$

حيث E_3 سالبة لأن اتجاهها (من القطب السالب إلى الموجب) في عكس اتجاه السهم .

نستنتج مما سبق أنه عند تطبيق قوانين كيرشوف على دائرة ما فإن تتبع اتجاهات التيار والاتجاه الذى يتخذه في المسار المغلق (اتجاه الأسهم في الشكل السابق) يكونان على درجة عالية من الأهمية للحصول على معادلات صحيحة .

ولحساب التيارات المختلفة في الشكل ١ – ١١ (I_3 , I_2 , I_1) يجب أن نقوم بحل ثلاث معادلات في آن واحد هي (14 - 1) و (15-1) و (16-1) أو (17 -1) . فإذا حصلنا في الناتج على تيار له إشارة سالبة فإن ذلك يعنى أن الاتجاه الفعلي للتيار في عكس الاتجاه المفروض أصلاً قبل إيجاد الحل .

مثال ٢

فى الشكل ١ – ١١

نفرض أن قيم المقاومات هى : $R_1 = 10\,\Omega , R_2 = 2\,\Omega , R_3 = 5\Omega$

والقوى الدافعة الكهربائية هى : $E_1 = 6\,(V)\ \&\ E_2 = 4\,(V)\ \&\ E_3 = 2\,(V)$

أحسب اتجاهات التيارات المارة في كل مقاومة من المقاومات السابقة مع أخذ اتجاه المسار المغلق كما في الشكل .

الحــل

نفرض أن اتجاهات التيار المارة في المقاومات هي كما هو مبين بالشكل ١ – ١١.

بتطبيق القانون الأول لكيرشوف عند النقطة (d) نجد أن :

$$I_1 + I_2 = I_3 \longrightarrow \qquad (1)$$

ثم بتطبيق القانون الثانى لكيرشوف للمسارين المغلقين I , II .

بالنسبة للمسار I (الدائرة المغلقة) :

$$10\,I_1 - 2\,I_2 = 6 - 4 = 2 \longrightarrow \quad (2)$$

وبالنسبة للمسار الثانى II :

$$2\,I_2 + 5\,I_3 = 4 - 2 = 2 \longrightarrow \quad (3)$$

ثم نقوم بحل المعادلات الثلاث الآتية (1) ، (2) ، (3) .

بالتعويض من (1) في (3) ينتج أن:

$$2\,I_2 + 5\,(I_1 + I_2) = 2$$

أي إن :

$$5\,I_1 + 7\,I_2 = 2 \qquad (4)$$

من (2) ، (4) يمكن حساب قيم التيارين I_1, I_2 فينتج أن

$$I_1 = 0.225\ (A) \qquad I_2 = 0.125\ (A) \qquad (5)$$

ولحساب I_3 نقوم بالتعويض من المعادلة (5) فى المعادلة (1) فينتج أن:

$$I_3 = 0.35 \quad (A)$$

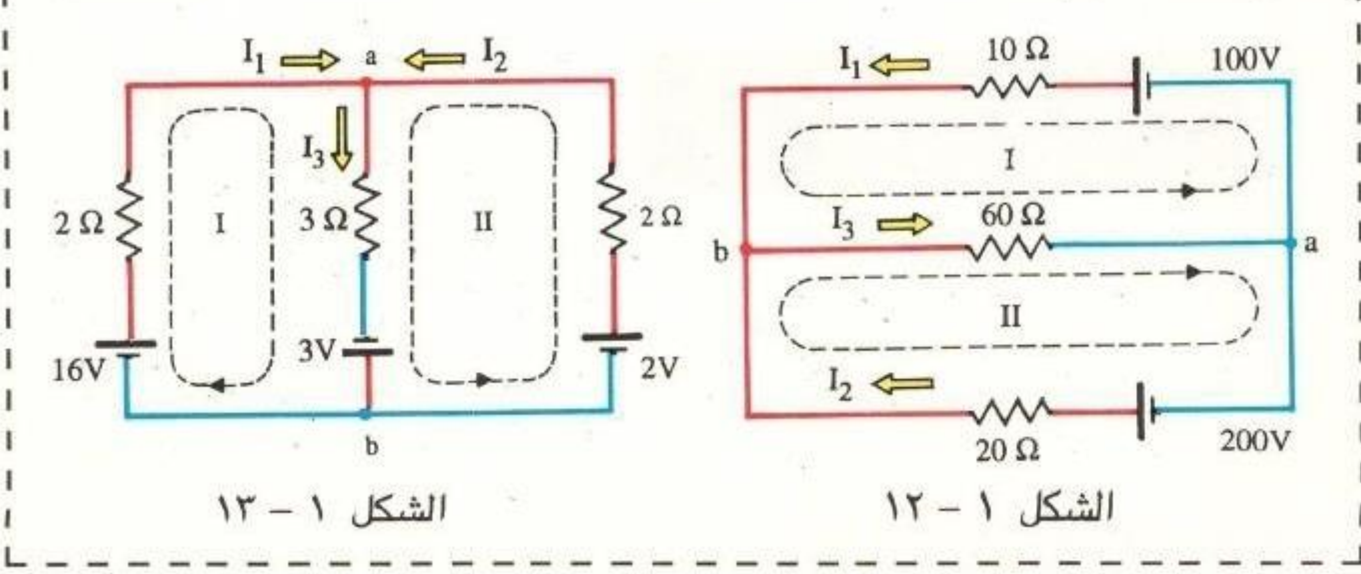
ونلاحظ أن قيم I_1 , I_2 , I_3 كلها موجبة ، وهذا يعني أن الاتجاهات الفعلية للتيارات الثلاثة مطابقة للاتجاهات التى فرضناها على الرسم قبل الحل .

سؤال ١٤

فى الشكل ١ - ١٢ احسب قيم I_1 , I_2 , I_3 وأوجد اتجاهات التيار . ابدأ الحل مفترضاً أن اتجاهات التيار كما هو موضح بالرسم .

سؤال ١٥

فى الشكل ١ - ١٣ احسب قيم I_1 , I_2 , I_3 بفرض أن اتجاهات التيار مطابقة لاتجاهات الأسهم .



الشكل ١ - ١٣

الشكل ١ - ١٢

حـ - دائرة القنطرة Bridge circuit

فى دائرة القنطرة توجد أربعة مقاومات R_1 , R_2 , R_3 , R_4، ونقطتى توصيل هما النقطة (b) بين المقاومتين R_1 , R_2 والنقطة (c) بين المقاومتين R_3 , R_4 . كما هو موضح بالشكل ١ - ١٤ .

فى هذا الشكل إذا كان الجهد عند النقطة (b) مساويًا للجهد عند النقطة (c) فإننا نحصل على المعادلة :

$$R_1 I_1 = R_3 I_2 \quad , \quad R_2 I_1 = R_4 I_2 \qquad (1 - 18)$$

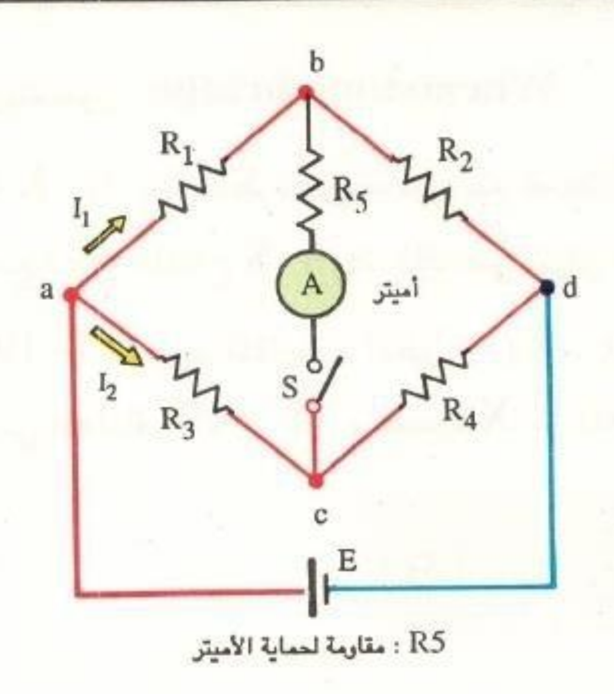
وتسمى القنطرة في هذه الحالة قنطرة متزنة ، وفي هذه الحالة لايمر تيار في الأميتر عند إغلاق المفتاح S .

من المعادلة (18 - 1) نحصل على العلاقة :

$$\frac{R_1 I_1}{R_2 I_1} = \frac{R_3 \ I_2}{R_4 \ I_2}$$

ومن هذا ينتج أن :

$$R_1 R_4 = R_2 \ R_3 \quad \text{أو} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \qquad (1 - 19)$$



الشكل ١ – ١٤ دائرة القنطرة

وتستخدم فكرة دائرة القنطرة في قياس المقاومات بدقة، ويطلق عليها في هذه الحالة قنطرة هويتستون . ويوضح الشكل ١ – ١٥ شكل هذه القنطرة والدائرة المكافئة لها وكذلك شكل الجلفانومتر * .





(أ) فكرة قنطرة هويتستون (الدائرة الكهربائية) (ب) صورة قنطرة هويتستون (جـ) جلفانومتر

الشكل ١ – ١٥ قنطرة هويتستون والجلفانومتر

د – طريقة عمل قنطرة هويتستون Wheatstone bridge

لقياس مقاومة مجهولة X بواسطة قنطرة هويتستون يتم ضبط المقاومة R_4 حتى لايمر تيار في الجلفانومتر حتى مع إغلاق المفتاح S ، يدل ذلك على اتزان القنطرة .

ثم نعوض في المعادلة (19 - 1) بقيم المقاومات المعلومة R_1 , R_3 , R_4 للحصول على قيمة X التى تناظر R_2 في المعادلة (19 - 1) ونحسب X من المعادلة : **

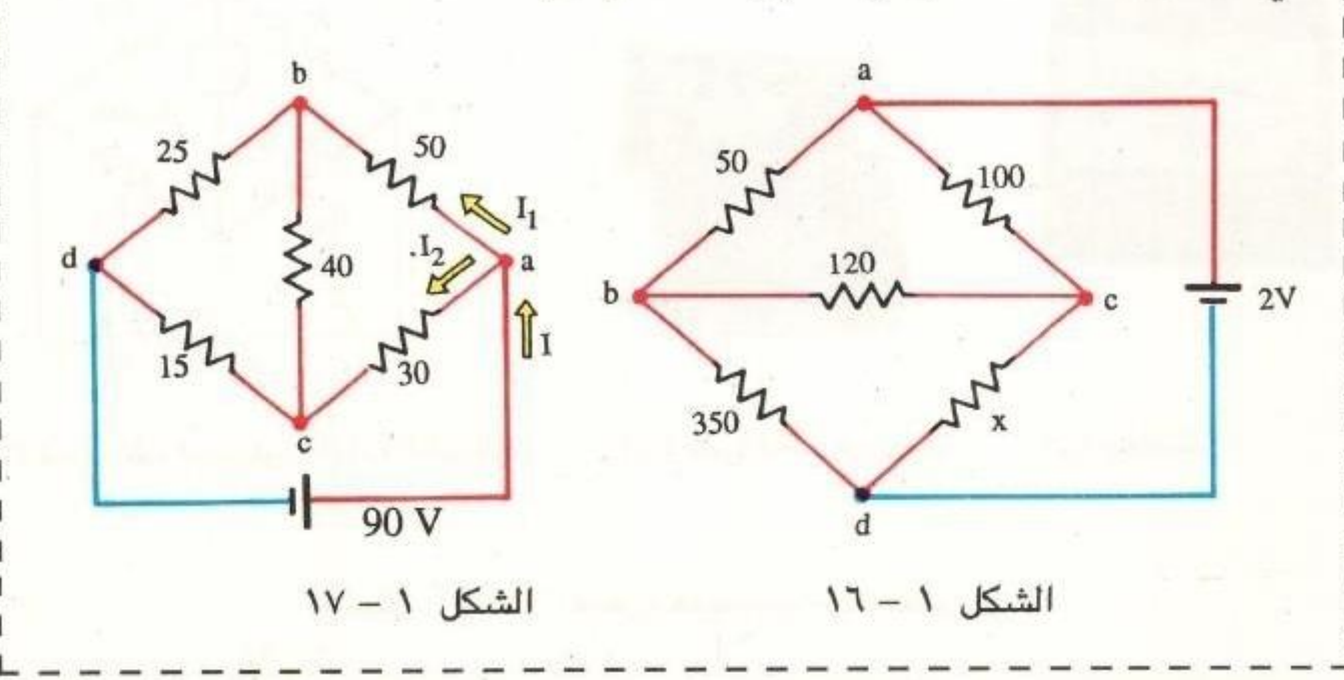
$$X = \frac{R_1}{R_3} R_4 \quad \{ \Omega \} \qquad (1 - 20)$$

سؤال١٦

في الشكل ١ – ١٦ احسب قيمة المقاومة المجهولة X بفرض اتزان القنطرة .

سؤال١٧

في الشكل ١ – ١٧ احسب قيمة التيارات I , I_1 , I_2



الشكل ١ – ١٧

الشكل ١ – ١٦

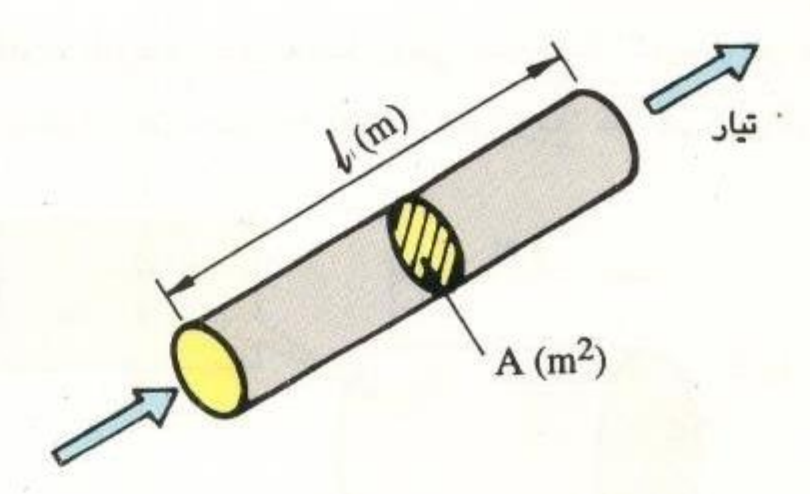
* الجلفانومتر Galvanometer هو جهاز قياس يستخدم لقياس شدة التيار وقيم الجهد المتناهية في الصغر

** في قنطرة هويتستون يتم القياس عندما لايتحرك مؤشر الجلفانومتر، وهذه تسمى طريقة " صفرية " ، وهي أدق طرق القياس التي تعتمد على انحراف المؤشر وحركته، لأنه في مثل هذه الطرق يحتاج المؤشر لطاقة تحركه ويستمدها من الدائرة المقاسة مما يؤثر على القيمة المقاسة (شدة تيار أو فرق جهد) .

١ – ٣ المقاومة الكهربائية Electric resistance

١ – ٣ – ١ مقاومة الموصل conductor

تختلف مقاومة الموصل تبعاً لنوع المادة المصنوع منها . وبالنسبة للمقاومات المصنوعة من المادة نفسها ، فإن زيادة مساحة المقطع تقلل المقاومة وزيادة طول الموصل يزيد المقاومة .



الشكل ١ – ١٨ مقاومة الموصل .

وحدة القياس	رمز الوحدة	العلاقة بين الوحدات
ميجا أوم	$M\Omega$	$1\ M\Omega = 10^6\ \Omega$
كيلو أوم	$k\Omega$	$1\ k\Omega = 10^3\ \Omega$
أوم	Ω	
مللي أوم	$m\Omega$	$1\ m\Omega = 10^{-3}\ \Omega$
ميكرو أوم	$\mu\Omega$	$1\ \mu\Omega = 10^{-6}\ \Omega$

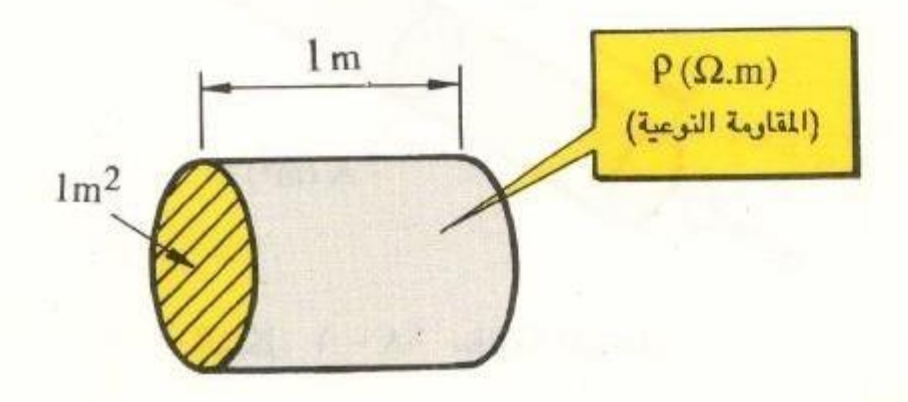
الجدول ١ – ٢ وحدات قياس المقاومة

أي إن مقاومة أي موصل بوجه عام تتناسب طردياً مع طوله وتتناسب عكسياً مع مساحة مقطعه .

ولحساب قيمة مقاومة مصنوعة من موصل طوله ℓ (متر) ومساحة مقطعه A (متر مربع) نستخدم العلاقة .

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \{ \Omega \} \qquad (1-21)$$

حيث ρ هي المقاومة النوعية لمادة الموصل، وهي قيمة ثابتة للموصل الواحد وتساوي مقاومة موصل من هذه المادة طوله متر ومساحة مقطعه متر مربع؛ كما هو مبين في الشكل ١ – ١٩



الشكل ١ – ١٩ المقاومة النوعية Resistivity

وحدة قياس المقاومة النوعية هي الأوم . متر ويرمز لها بالرمز $(\Omega\ .\ m)$ وتحسب من المعادلة :

$$\rho = \frac{RA}{l}\ \frac{(\Omega)(m^2)}{(m)} = \frac{RA}{l}\ (\Omega\,.\,m) \qquad (1-22)$$

ويبين الجدول ١ – ٣ قيم المقاومة النوعية لبعض المعادن بينما يبين الجدول ١ – ٤ وحدات قياس المقاومة النوعية .

المعدن	المقاومة النوعية $\rho[\Omega.m]\ x10^{-8}$
الالومنيوم	2.75
الفضه	1.62
النحاس	1.72
البلاتين	10.6

الجدول ١ – ٣ المقاومة النوعية للمعادن $(20^{o}C)$

وحدة القياس	العلاقة بين الوحدات
$\Omega.m$	
$\Omega.cm$	$1\ \Omega.cm = 10^{-2}\ \Omega.m$
$\Omega.mm^2/m$	$1\ \Omega.mm^2/m = 10^{-6}\ \Omega.m$

الجدول ١ – ٤ وحدات قياس المقاومة النوعية

مثال ٣

احسب مقاومة سلك من النحاس طوله 50 متراً وقطره 2 ملليمتر عند درجة حرارة 20 درجة مئوية.

الحل

لحساب مساحة مقطع الموصل بمعلومية طول القطر تستخدم العلاقة :

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (2 X 10^{-3})^2}{4} = \pi X 10^{-6} \ m^2$$

من العلاقة (21 - 1) يمكن حساب قيمة المقاومة R :

$$R = 1.72 X 10^{-8} X \frac{50}{\pi X 10^{-6}} = 0.274 \ \Omega$$

سؤال ١٨

احسب مقاومة سلك من الألومنيوم نصف قطره 0.5 مم، وطوله 12 متراً عند درجة حرارة 20 درجة مئوية.

سؤال ١٩

سلك معدنى طوله 10 أمتار، ومساحة مقطعه 1 مم٢، ومقاومته 0.4 أوم . احسب المقاومة النوعية لهذا المعدن .

١ – ٣ – ٢ التوصيلية النوعية Conductivity

بالإضافة إلى المقاومة النوعية تستخدم التوصيلية النوعية للتعبير عن مدى سهولة سريان التيار الكهربائي في مادة ما . ووحدة قياس التوصيلية النوعية هي السيمنز لكل متر (S/m) والتوصيلية النوعية (ويرمز لها بالرمز σ) هي مقلوب المقاومة النوعية كما يتضح من العلاقة التالية :

$$\sigma = 1 / \rho \qquad (1-23)$$

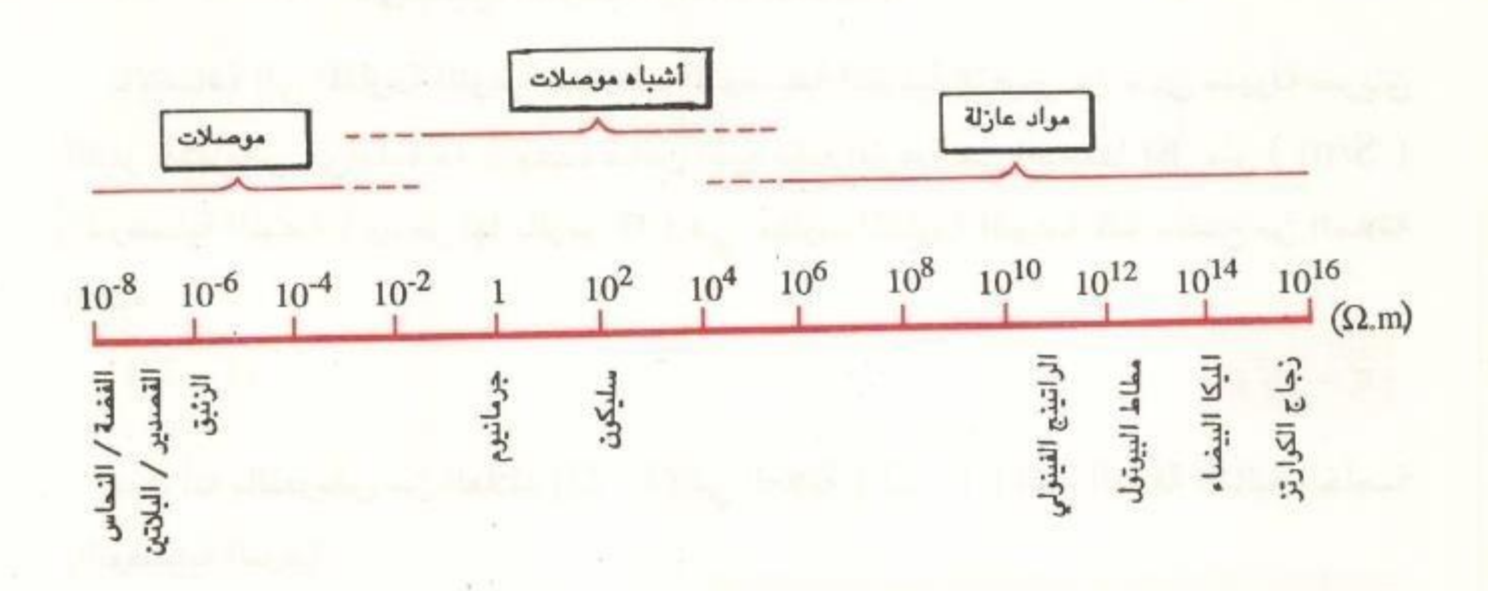
حيث أنه بالتعويض من العلاقة (22 - 1) في العلاقة (23 - 1) تنتج العلاقة التالية الخاصة بالتوصيلية النوعية

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\frac{RA}{l}} = \frac{l}{RA} \quad (S/m) \qquad (1-24)$$

أما التوصيلية النوعية النسبية فتستخدم للتعبير عن النسبة المئوية للتوصيلية النوعية للمعدن بالنسبة للتوصيلية النوعية للنحاس المعالج المعياري الدولي. وتبلغ قيمة التوصيلية النوعية للنحاس المعالج المعيارى الدولي : 5.8×10^7 S/m

١ – ٣ – ٣ الأنواع المختلفة للمقاومات

يوضح الشكل ١ – ٢٠ المقاومة النوعية لمواد مختلفة عند درجة الحرارة العادية، ومن هذا الشكل يتبين لنا أن المواد التي تكون مقاومتها النوعية أقل من 10^{-4} أوم . متر يطلق عليها الموصلات لأنها توصل التيار الكهربائي بسهولة . أما المواد التي تزيد مقاومتها النوعية على 10^4 أوم . متر؛ فهي تسمى مواد عازلة لصعوبة توصيلها للتيار الكهربائي . أما أشباه الموصلات التي سنتناولها فيما بعد فتكون قيم مقاومتها النوعية متوسطة بين الموصلات والمواد العازلة .

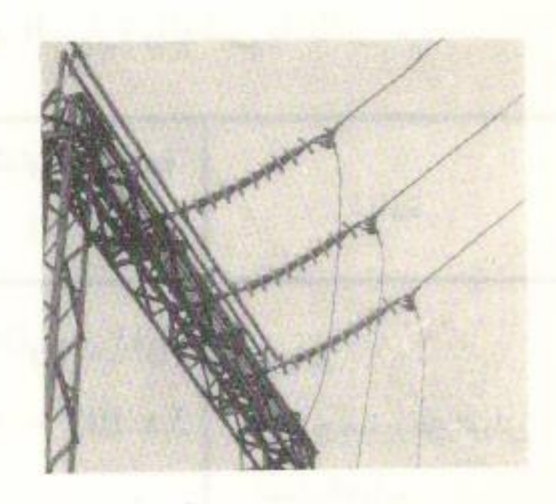


الشكل ١ – ٢٠ المقاومة النوعية لمواد مختلفة

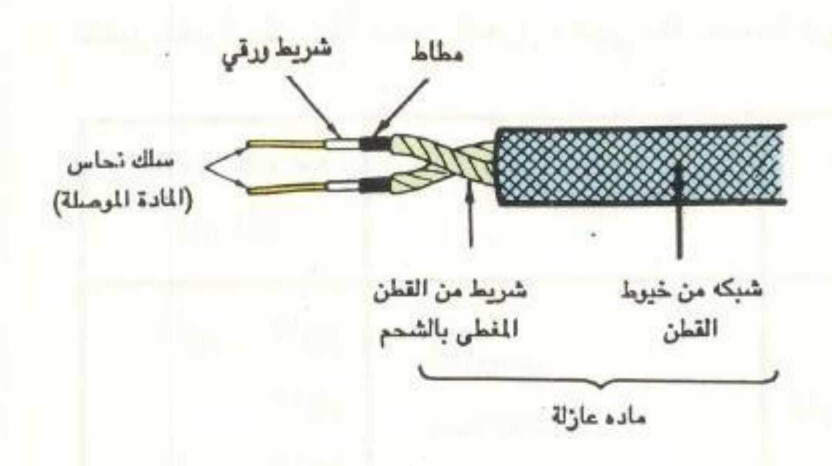
أ – مقاومة العزل Insulation resistance

تُستخدم المواد العازلة لمنع مرور أو تسرب التيار الكهربائي غير المرغوب في مروره . فعلى سبيل المثال في الأسلاك المستعملة في التوصيلات الكهربائية للمنازل يكون كل من السلكين المستخدمين مغطى بمادة عازلة ويتم تجميعهما أحياناً في غلاف واحد .

أما بالنسبة لخطوط نقل القدرة العالية فتستخدم مادة البورسلين (الخزف) كعازل .



أ – مادة عازلة مستخدمه في خطوط نقل القدرة



ب – مثال لسلك معزول مغطى بمادة قطنيه

الشكل ١ – ٢١ استخدمات المواد العازلة

إن تغطية الموصلات بالمواد العازلة ووضعها داخل الكوابل يجعل التيار المتسرب عند وجود فرق جهد عالٍ قليلاً للغاية . وهذا التيار المتسرب يمر من خلال جزء من المادة العازلة تكون مقاومته النوعية صغيرة نسبياً نتيجة لوجود شوائب المادة العازلة أو قلة سمكها عن باقي الأجزاء .

ويطلق على النسبة بين فرق الجهد والتيار المتسرب اسم " مقاومة العزل " . فإذا كانت قيمة الجهد V فولت والتيار المتسرب I_o أمبير؛ فإن مقاومة العزل R (بالأوم) تتحدد من العلاقة:

$$R = \frac{V}{I_o} \ (\Omega) \qquad (1-25)$$

ويوضح الجدول ١ – ٥ المقاومة النوعية لبعض أنواع المواد العازلة . وهذه المقاومة النوعية تتغير تغيراً ملحوظاً بتغير الحرارة فهي تقل حينما تزيد الحرارة والعكس بالعكس .

المقاومة النوعية (Ω.m)	المادة	المقاومة النوعية (Ω.m)	المادة
$10^{10} \sim 10^{11}$	كلوروبرين	$10^{13} \sim 10^{17}$	البرافين
10^{13}	الميكا (قالب)	$5 \times 10^{12} \sim 10^{13}$	راتينج صلب من البولي
$10^{10} \sim 10^{12}$	فلدسبار من الصيني		فينيل كلورايد
أكبر من 10^{16}	زجاج الكوارتز	أكبر من 10^{14}	بوليثيلين
		$10^{15} \sim 10^{19}$	بوليستر
		$10^{13} \sim 10^{15}$	المطاط الطبيعي

الجدول ١ – ٥ المقاومة النوعية للمواد العازلة (عند درجة حرارة الغرفة) .

ب – مقاومة الطرف الأرضي ومقاومة التلامس

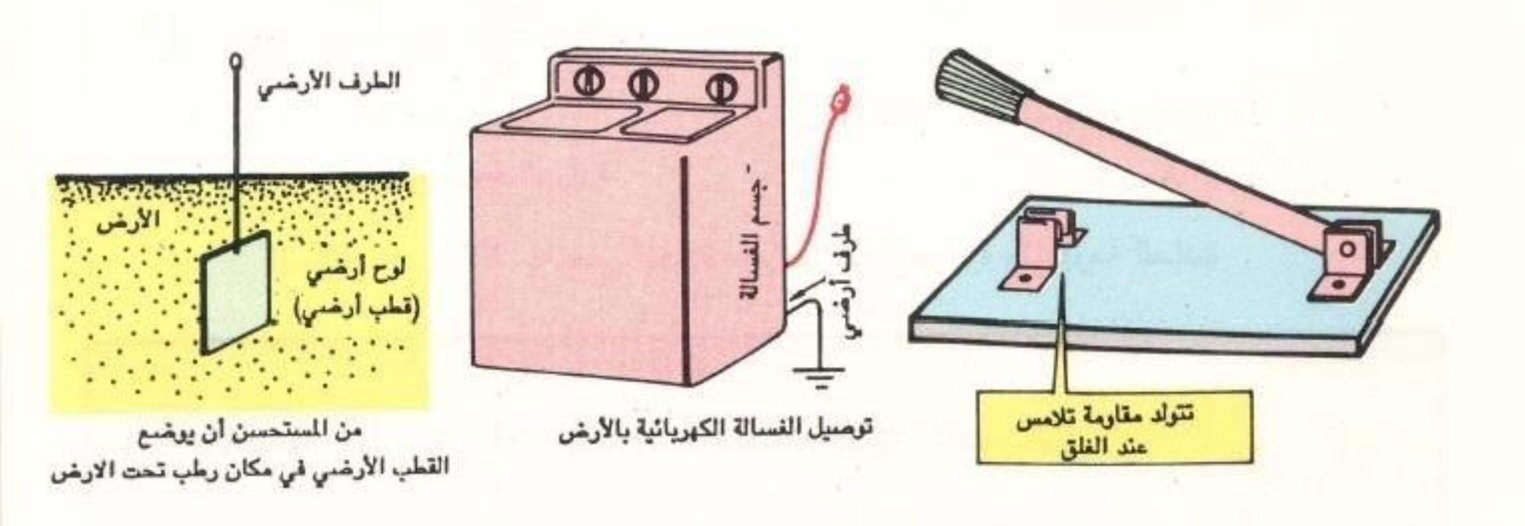
Grounding and contact resistance

عادة مايتم توصيل طرف من الآلة الكهربائية عن طريق سلك موصل بلوح معدني مدفون تحت سطح الأرض، ويسمى هذا الطرف بالطرف الأرضي، ويكون الغرض منه منع حوادث الصدمات الكهربائية . وتكون مقاومة الأرض هي المقاومة بين اللوح المدفون والأرض . وفي أغلب الأحوال ينص القانون على وجوب توصيل الطرف الأرضي ويبين طريقة توصيله . ويستثنى من ذلك بعض الحالات الخاصة .*

أما المقاومة الناتجة عن تلامس جزء من موصلين، مثل تلامس سلكين أو تلامس موصل مع

فتحة منبع التيار (القابس) مثلاً ، هذه المقاومة تسمى بمقاومة التلامس .

وفي حالة عدم حدوث التلامس بصورة كاملة (نتيجة لسوء التثبيت مثلاً) فإن ذلك يؤدى إلى ارتفاع درجة حرارة الجزأين المتلامسين ومرور تيار ** مما يؤدي إلى عدم اتصال أو عدم تجانس التوصيل نتيجة لأكسدة جزء من السطح الملامس ، وقد يؤدي ذلك إلى حدوث حرائق . ويجب أن تكون مقاومة التلامس أقل مايمكن .

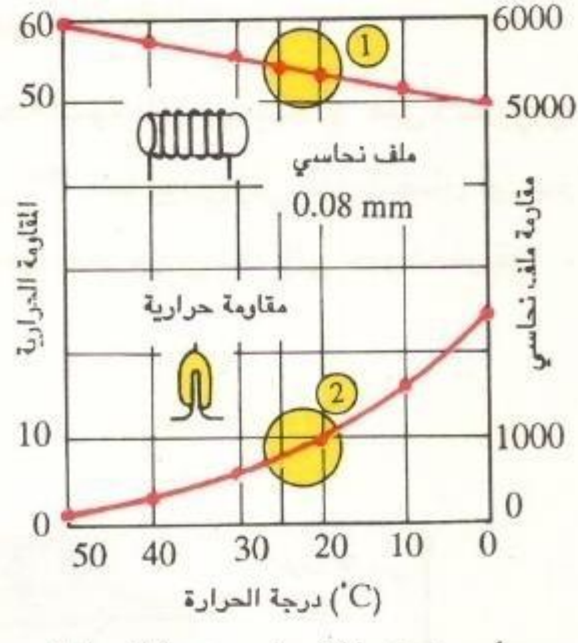


الشكل ١ – ٢٢ مقاومة الطرف الأرضي ومقاومة التلامس .

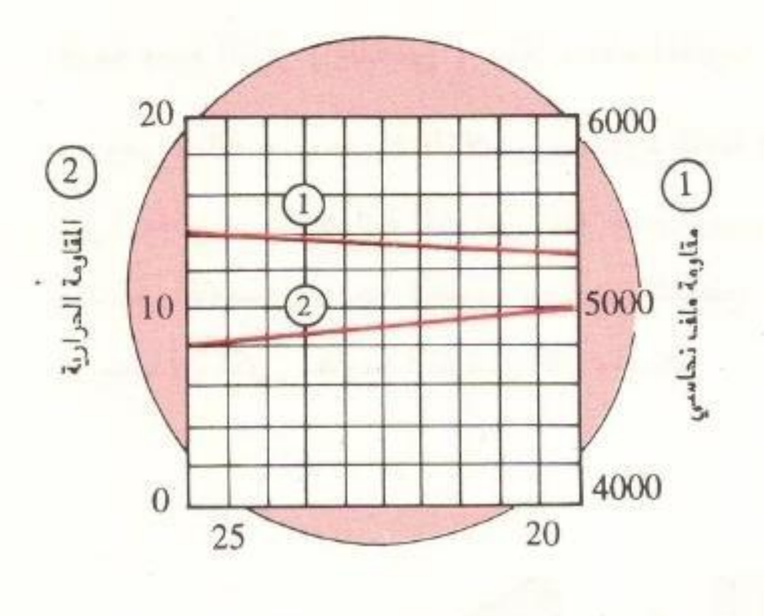
١ – ٣ – ٤ درجة الحرارة وتأثيرها على المقاومة

Temperature and electric resistance

عادة ما تتغير مقاومة المادة تغيراً ملحوظاً مع تغير درجة الحرارة . وبالنسبة للمعادن ، عادة تزيد المقاومة مع زيادة الحرارة . وعلى العكس من ذلك فإن المواد غير المعدنية مثل أشباه الموصلات والكربون والمحلول الإلكتروليتي لها خاصية انخفاض المقاومة مع ارتفاع درجة الحرارة *** .



أ – منحنى المقاومة مع درجة الحرارة



ب -- جزء مكبر من الشكل أ

الشكل ١ – ٢٣ منحنى العلاقة بين درجة الحرارة والمقاومة للمادة

* المقصود هنا التعليمات القياسية الهندسية للأجهزة الكهربائية .

** التيار المار في المقاومة يسبب طاقة حرارية . وهذا ما يعرف بحرارة " چول "

*** تزداد اهتزازات ذرات المعدن باكتسابها للطاقة الحرارية بزيادة درجة الحرارة .

ونتيجة لذلك تصبح حركة الإلكترونات الحرة بين الذرات أكثر صعوبة، وينتج عن ذلك زيادة المقاومة . ولكن بالنسبة لأشباه الموصلات والمحاليل الإلكتروليتية فيكون لها كمية قليلة نسبياً من الإلكترونات الحرة في الحالة العادية ، ويزداد عدد هذه الإلكترونات الحرة بزيادة درجة الحرارة وتصبح الإلكترونات نشطة مما ينتج عنه انخفاض المقاومة .

المعامل الحراري هو النسبة بين الزيادة في المقاومة لكل ارتفاع مقداره درجة مئوية واحدة للحرارة إلى القيمة الأصلية للمقاومة . ويكون المعامل الحراري لمقاومة المواد المعدنية موجباً

بينما يكون سالباً للمواد غير المعدنية نظرا لانخفاض مقاومتها تبعاً لارتفاع درجة الحرارة .

ويوضح الشكل ١ – ٢٣ مثالين لمنحنى العلاقة بين درجة الحرارة والمقاومة للنحاس والمقاومة الحرارية . فإذا كانت مقاومة موصل عند درجة حرارة t_1 درجة مئوية مقدارها R_{t1} أوم ،ثم أصبحت R_{t2} عندما زادت درجة الحرارة إلى t_2 درجة مئوية تكون الزيادة في المقاومة لكل درجة مئوية تساوي:

$$\frac{R_{t2} - R_{t1}}{t_2 - t_1} \ (\Omega / {}^0C)$$

ويكون المعامل الحرارى (ويرمز له بالرمز α_{t1}) للمقاومة هو نسبة زيادة المقاومة لكل درجة مئوية واحدة ، ويعبر عنه بالعلاقة الآتية بقسمة الزيادة في المقاومة لكل درجة حرارة واحدة على القيمة الأصلية للمقاومة :

$$\alpha_{t1} = \frac{\frac{R_{t2} - R_{t1}}{t_2 - t_1}}{R_{t1}} = \frac{R_{t2} - R_{t1}}{R_{t1} \ (t_2 - t_1)} \ ({}^oC^{-1}) \qquad (1 - 26)$$

فإذا كانت مقاومة موصل عند درجة حرارة t_1 مقدارها R_{t1} أوم ، وكان المعامل الحراري عند درجة الحرارة هذه يساوي α_{t1} ؛ فإن قيمة المقاومة عند درجة حرارة t_2 تعطى من العلاقة التالية المستنتجة من المعادلة (26 - 1) :

$$R_{t2} = R_{t1} \ [1 + \alpha_{t1} \ (t_2 - t_1)] \ \ (\Omega) \qquad (1 - 27)$$

وهذه العلاقة بين درجة الحرارة وقيمة المقاومة تمكننا من معرفة درجة الحرارة بقياس قيمة مقاومة موصل . وفي الجدول ١ – ٦ توجد قيم المعامل الحراري للمقاومة والمقاومة النوعية للمعادن .

المعدن	المقاومة النوعية $\rho[\Omega.m]$		المعامل الحراري للمقاومة $(20\text{~}100^oC)$ α_{20}* $[^oC^{-1}]$
	(20^oC) ρ_{20}	(100^oC) ρ_{100}	
	$x10^{-8}$	$x10^{-8}$	$x10^{-3}$
الزنك	5.9	7.8	4.0
الألومنيوم	2.75	3.55	3.6
الذهب	2.4	2.88	2.5
الفضة	1.62	2.08	3.5
التنجستن	5.5	7.3	4.1
الحديد	9.8	14.7	6.3
النحاس	1.72	2.23	3.7
البلاتين	10.6	13.6	3.5

$$* \quad \alpha_{20}=\frac{R_{100}-R_{20}}{80\,R_{20}}=\frac{\rho_{100}-\rho_{20}}{80\,\rho_{20}}. \quad [^oC^{-1}]$$

الجدول ١ – ٦ المقاومة النوعية للمعادن والمعامل الحرارى للمقاومة .

مثال ٤

إذا كانت مقاومة سلك من النحاس 5 أوم عند درجة حرارة 20 درجة مئوية . احسب المقاومة عند درجة حرارة 100 درجة مئوية .

وذلك باستخدام قيمة المعامل الحراري للمقاومة لمادة النحاس المعطاة في الجدول١–٦

الحـــل

المعامل الحرارى للنحاس عند درجة 20 درجة مئوية $(\alpha\,20)$ هو

$$\alpha_{20} = 3.7 \times 10^{-3}\ (\,^oC^{-1})$$

بفرض أن قيمة المقاومة عند 100 درجة مئوية هى R_{100} فيمكن حساب قيمتها من العلاقة (1-27) :

$$R_{100} = R_{20} \{ 1 + \alpha_{20} (100 - 20) \}$$

$$= 5 \times \{ 1 + 3.7 \times 10^{-3} \times (100 - 20) \} = 6.48\ \Omega$$

سؤال٢٠

إذا كانت مقاومة سلك من النحاس اللين هي 12.34 أوم عند 20 درجة مئوية . احسب درجة حرارة السلك إذا أصبحت مقاومته 14.45 .

سؤال٢١

مقاومة سلك من النيكل الكروم هى 20 أوم والمعامل الحرارى لمقاومته $0.4 \times 10^{-3}\ {}^{o}C^{-1}$ عند درجة حرارة 1000 درجة مئوية . أحسب المقاومة عند 20 درجة مئوية .

أ- التوصيلية الكهربائية الفائقة Superconductivity

عند انخفاض درجة الحرارة إلى درجة تقترب من الصفر المطلق (273-) درجة مئوية تصل مقاومة المعدن فجأة إلى الصفر، ويطلق على هذه الظاهرة التوصيلية الفائقة .

وقد تم اكتشاف عدد كبير من الأنواع الجديدة من المواد التى لها خاصية التوصيلية الفائقة مؤخراً . وبعض تلك العناصر يصل إلى حالة التوصيلية الفائقة عند درجة حرارة أكبر من (100-) درجة مئوية .

وفى حالة التوصيلية الفائقة تمر تيارات دائرية بصفة مستمرة وإلى مالانهاية وذلك نتيجة لانعدام المقاومة، ويولِّد ذلك مجالاً مغناطيسياً حول التيار يمكننا من صناعة مغناطيس قوي .

وتستخدم هذه الخاصية في تسيير القطارات على الوسائد المغناطيسية .



الشكل ١ – ٢٤ قطار يسير على وسادة مغناطيسية .

والقطار الذي نراه في الشكل ١ – ٢٤ هو قطار تجريبى طراز MLU001 يستخدم في خطوط ميازاكي التجريبية في اليابان.

١ – ٤ التأثير الحرارى للتيار والقدرة الكهربائية Electric power

١ – ٤ – ١ حرارة " چول " Joule heat

عندما يمر تيار كهربائي في مقاومة ؛ فإنه يولد طاقة حرارية وهذه الطاقة الحرارية تعرف باسم حرارة چول *.

فعلى سبيل المثال السخان الكهربائي يولد حرارة چول . وهذه الحرارة تتناسب مع حاصل ضرب مربع شدة التيار في المقاومة، وهذا هو مايعرف بقانون چول .

جيمس بريسكوت چول: (١٨١٨ – ١٨٨٩)

عالم فيزياء بريطاني، وهو الابن الثاني لصانع مشروبات ولد في مدينة سالفورد بإنجلترا.

فى عـام ١٨٣٠ تحـركت أول قـاطرة بخـارية من مـانشـسـتـر إلى ليـفربول، وفى هذه الأثناء كان چول يفكر في إمكانية استخدام الطاقة الكهرومغناطيسية بدلاً من البخار . ولكنه توصل إلى أن هذا لايمكن تحقيقه. ولهذا فقد حوَّل اهتمامه إلى دراسة الشغل الميكانيكى والقياسات الحرارية اثناء تشغيل الماكينات . وفى عام ١٨٤٠ اكتشف قانون يتعلق بالتأثير الحرارى للتيار الكهربائى .

ثم نشـر بالإضـافـة إلى ذلك بحثـاً علميـاً في عـام ١٨٤٣ يتـعلق بتـحـويل الطاقـة الميكانيكية إلى حرارة مما ساعد على تطور نظرية الديناميكا الحرارية .

ووحـدة قيـاس الشغل (وهى الچول الذى يرمز له بالرمز J) سميت كذلك نسبة إليه.

وحدة قياس الحرارة هي الچول الذى يرمز له بالرمز (J) .

والچول الواحد يعبر عن كمية الطاقة الحرارية التي تتولَّد عند مرور تيار كهربائى شدته 1 أمبير في مقاومة قيمتها 1 أوم لمدة ثانية واحدة، وهى أيضاً كمية الحرارة نفسها التي ترفع درجة حرارة 1 كجم من الماء بمقدار $\frac{1}{4.19 \times 10^{3}}$ أي 0.24×10^{-3} درجة مئوية ** .

فإذا افترضنا أن فرقاً في الجهد مقداره V ڤولت موجود بين طرفي مقاومة قيمتها R أوم مما يسبب تياراً شدته I أمبير لزمن مقداره T ثانية ؛ فإن الطاقة الحرارية المتولدة H {چول} يمكن التعبير عنها بالعلاقة التالية :

$$H = RI^{2}t = VIt \quad (J) \qquad (1-28)$$

سؤال ٢٢

بفرض أن سلكاً كهروحرارياً يسمح بمرور تيار مقداره 4 أمبير عند وجود فرق جهد مقداره 100 ڤولت .

احسب قيمة الطاقة الحرارية المتولدة نتيجة لمرور التيار في هذا السلك الكهروحراري لمدة دقيقة واحدة .

* تتولد حرارة چول نتيجة لتحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية تنشأ عن تصادم الإلكترونات بالنواة في الموصل الكهربائي .

** يتطلب رفع درجة حرارة جرام واحد من الماء بمقدار درجة مئوية واحدة طاقة حرارية مقدارها 4.19 چول .

١ - ٤ - ٢ القدرة والطاقة الكهربائية Electric Power and Energy

عندما نسلط فرق جهد على حمل كهربائي ينشأ عند ذلك سريان تيار كهربائي، ويمكن لهذا التيار أن يؤدي وظائف عديدة مثل إدارة موتور عن طريق تحويل الطاقة الكهربائية إلى أخرى ميكانيكية ، أو الإنارة بتحويلها إلى طاقة ضوئية أو تسخين سلك - النيكل كروم الموجود في السخان الكهربائي عن طريق تحويلها إلى طاقة حرارية .

وتعرف القدرة الكهربائية بمقدار الشغل المبذول في وحدة الزمن ووحدة قياس القدرة الكهربائية هي الوات ورمزه (W) . والقدرة الكهربائية التى قيمتها 1 (وات) تعني بذل شغل مقداره 1 چول لمدة ثانية واحدة . لذلك يمكن كتابة مقدار القدرة الكهربائية P(بالوات)الناشئة عن مرور تيار مقداره I أمبير بين طرفين فرق الجهد بينهما V ڤولت على الصورة التالية :

$$P = VI \ (W) \qquad (1 - 29)$$

أما الطاقة الكهربائية ووحدة قياسها الچول (J) فهى مقدار الشغل الذى يبذله التيار في زمن ما ، ويعبر عنها بحاصل ضرب القدرة في الزمن . فإذا كانت القدرة هى P (وات) والزمن t ثانية والطاقة الكهربائية هى W_p (چول) فى الزمن t، فيمكن التعبير عن الطاقة بالمعادلة :

$$W_p = Pt = VIt \ (J) \qquad (1 - 30)$$

وعلى الرغم من أن وحدة قياس الطاقة الكهربائية هى الچول (وات . ثانية)؛ فإن وحدة الـ (وات . ساعة) التي يرمز لها بـ (W.h) أو الكليو وات ساعة (kW.h) هى الوحدات المستخدمة عادة . ويوضح الجدول ١ – ٧ وحدات قياس القدرة الكهربائية والطاقة الكهربائية .

الكمية	وحدة القياس	رمز الوحدة	العلاقة بين الوحدات
القدرة الكهربائية	مللي وات	mW	$1mW = \frac{1}{1000} W = 10^{-3}W$
	وات	W	
	كيلو وات	kW	$1 kW = 1000 W = 10^3W$
الطاقة الكهربائية	چول	J	
	وات ثانية	W.s	$1 W.s = 1J$
	وات ساعة	W.h	$1 W.h = 3600 W.s = 3.6 \times 10^3 W.s = 3.6 \times 10^3 J$
	كيلو وات ساعة	kW.h	$1 kW.h = 1000 \times 3600 W.s = 3.6 \times 10^6 W.s = 3.6 \times 10^6 J$

الجدول ١ – ٧ وحدات قياس القدرة الكهربائية والطاقة الكهربائية .

سؤال٢٣

كمية من الماء وزنها 1.5 كجم ودرجة حرارتها 20 درجة مئوية . احسب الوقت اللازم لرفع درجة حرارتها إلى 60 درجة مئوية عند استخدام سخان كهربائي قدرته 400 وات ، وعند استخدام سخان آخر قدرته 1000 وات .

افترض أنه ليس هناك فقد في الطاقة وأن رفع درجة حرارة 1 كجم من الماء لدرجة مئوية واحدة يتطلب 4.19×10^3 چول .

سؤال٢٤

عند استخدام مكواة كهربائية . افترض أن المقاومة 25 أوم عندما يكون فرق الجهد 100 ڤولت واحسب القدرة المستهلكة . احسب الطاقة الكهربائية عند استخدام المكواة باستمرار لمدة ساعة . أوجد الناتج بالچول وبالكليو وات . ساعة .

١ – ٤ – ٣ تطبيقات على حرارة " چول "

تسمى المواد التي تولد حرارة چول بالمواد ذات القدرة على التسخين . ويعدّ النيكل كروم مثالاً على المواد المعدنية ذات القدرة على التسخين، ومن أنواعه السلك الغني بالكروم والسلك المصنوع من الحديد والكروم . والنيكل كروم مادة ذات قدرة احتمال عالية وتتحمل التسخين لدرجات مرتفعة . أما السلك المصنوع من النيكل والحديد فإنه يضعف عند استخدامه في درجات حرارة عالية باستمرار . ومثل هذه المواد ذات القدرة على التسخين تستخدم في السخانات الكهربائية والأفران الكهربائية بعد أن تصنع على شكل ملف ويتم عزلها .

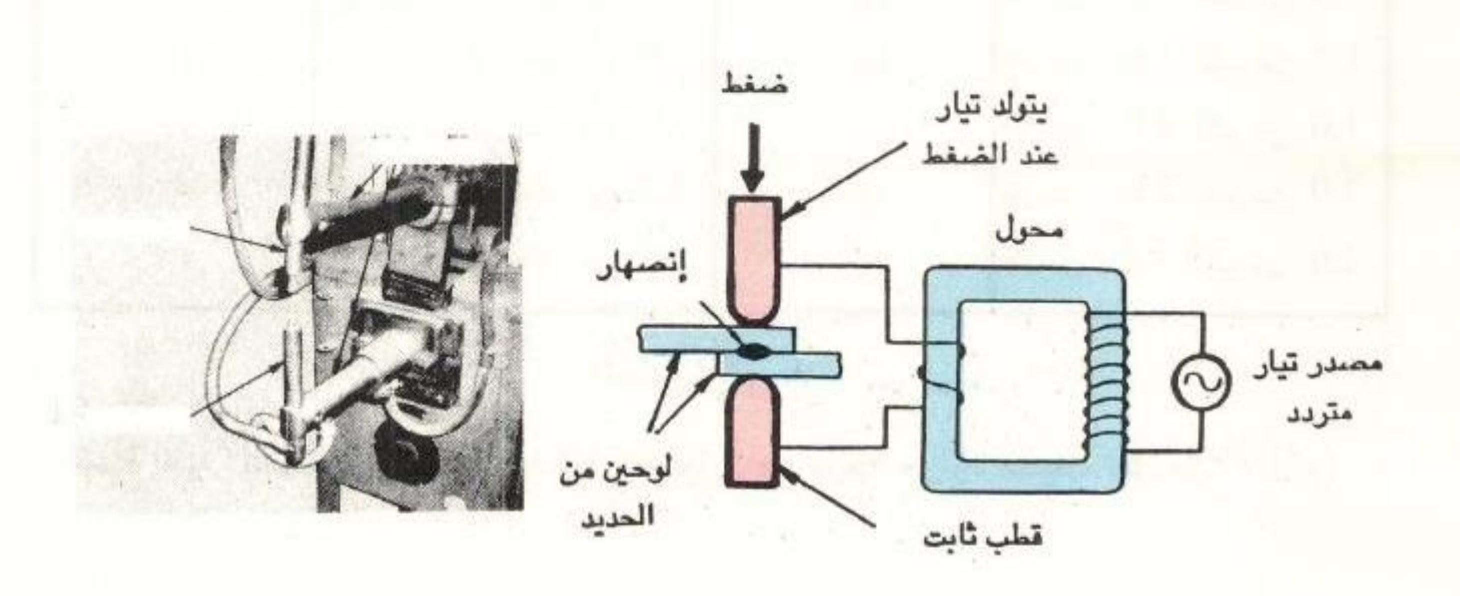
ومن أمثلة المواد غير المعدنية ذات القدرة على التسخين مواد مثل القماش المغطى بكربونات السليكون . وصمغ الإيبوكسي المضاف إليه مسحوق الكربون .

ويتم استخدام مثل تلك المواد في صناعة الوسائد والأغطية الكهربائية .

ومن التطبيقات الأخرى استخدام الفيوزات وقواطع الدوائر الكهربائية لكي تمنع حدوث الحرائق أو تتسبب في إتلاف المعدات أو التوصيلات الكهربائية . ومنها أيضاً اللحام بالقوس الكهربائي باستخدام الحرارة المتولدة من التيار الكهربائي .

لحام النقطة Spot welding

يتم صهر شريحة المعدن في المكان المراد توصيله كى تلتصق بالشريحة الأخرى عن طريق إمرار تيار كبير جداً لمدة قصيرة مع ضغط المعدن لتحقيق التلامس والالتصاق بين الشريحتين .



الشكل ١ – ٢٥ لحام النقطة

١ – ٤ – ٤ أعلى تيار مسموح به Allowable current

عند مرور تيار في أسلاك التوصيل الكهربائية تتولد طاقة حرارية نتيجة للمقاومة الصغيرة للأسلاك مما يرفع درجة حرارة السلك . وقد ينتج عن ذلك تلف المادة العازلة التى تغطى السلك.

ولمنع تلف هذه المادة العازلة لابد من تحديد قيمة التيار الذي يمكن أن يمر بدون إتلافها . وأعلى قيمة للتيار لاتسبب تلفاً للمادة العازلة تسمى بالتيار المسموح . ويبين الجدول ١–٨ التيار المسموح بالنسبة للأسلاك المغطاة بمادة الفينيل .

سلك مبروم		سلك مفرد	
شدة التيار القصوى [A]	المساحة الفعلية للمقطع $[mm^2]$	شدة التيار القصوى [A]	القطر [mm]
17	أقل من 1.25 أكبر من 0.9	16	أقل من 1.2 أكبر من 1.0
19	أقل من 2 أكبر من 1.25	19	أقل من 1.6 أكبر من 1.2
27	أقل من 3.5 أكبر من 2	27	أقل من 2.0 أكبر من 1.6
37	أقل من 5.5 أكبر من 3.5	35	أقل من 2.6 أكبر من 2.0
49	أقل من 8 أكبر من 5.5	48	أقل من 3.2 أكبر من 2.6

الجدول ١ – ٨

شدة التيار القصوى للأسلاك المغطاة بالفينيل (عند درجة حرارة محيطة اقل من 30^o م)

١ – ٥ الظاهرة الكهروحرارية Thermoelectric phenomenon

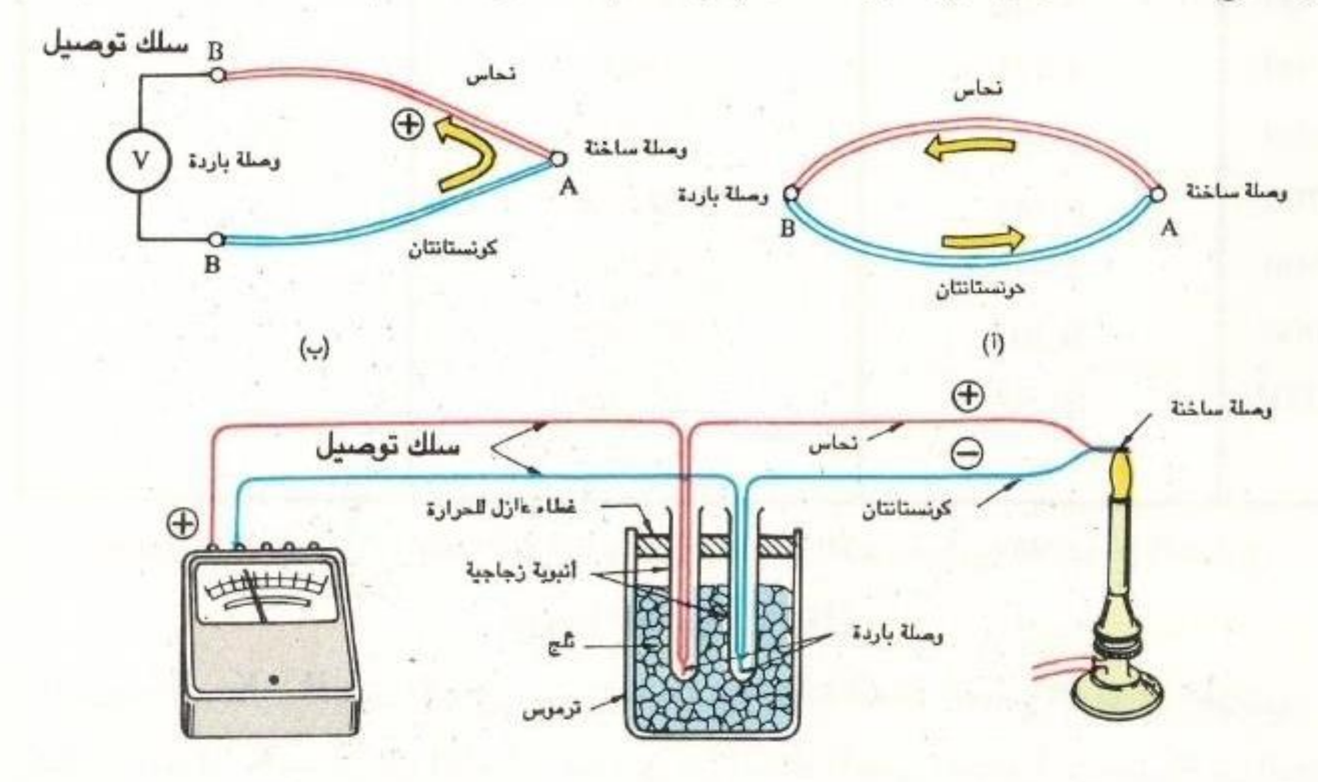
إذا كان لدينا سلكين من معدنين مختلفين، وقمنا بتوصيلهما في نقطة معينة ثم أغلقنا الدائرة كما في الشكل ١ – ٢٦ فإننا نلاحظ أن تغيير درجة الحرارة عند نقطة التوصيل يولد

قوة دافعة كهربية وينتج عن ذلك مرور تيار كهربائي . هذا التيار الكهربائي يؤدي إلى ظاهرتين إحداهما طاردة للطاقة والثانية ممتصة للطاقة عند نقطتي التوصيل ؛ وهاتان الظاهرتان تسميان بالظاهرة الكهروحرارية .

١ – ٥ – ١ تأثير سيبك Seebeck effect

عند توصيل معدنين مختلفين كما في الشكل ١–٢٦(أ) وتسخين الطرف A (ويعرف باسم الوصلة الدافئة) وتبريد الطرف B (ويعرف باسم الوصلة الباردة) تتولد قوة دافعة كهربائية ويمر تيار . وتسمى هذه القوة الدافعة الكهربائية بالقوة الدافعة الكهروحرارية بينما يسمى التيار المار بالتيار الكهروحراري . وتسمى تلك الوصلة التي تجمع بين معدنين مختلفين بالازدواج الحراري .

وتسمى هذه الظاهرة بتأثير سيبك نسبة إلى العالم الألماني سيبك (١٧٧٠ – ١٨٣١) .



الشكل ١ – ٢٦ تولد القوة الدافعة الكهروحرارية

عند الفصل بين المعدنين المكونين للازدواج الحراري، وتوصيلهما بسلك إلى جهاز قياس كما نرى في الشكل ١ – ٢٦ (ب) فإن القوة الدافعة الكهربائية تظل ثابتة إذا احتفظنا بدرجة حرارة الوصلة ثابتة ، ويسمى المعدن المستخدم في التوصيل بالمعدن الوسيط .

ويبين الجدول ١ – ٩ فرق درجات الحرارة والقوة الدافعة الكهروحرارية المناظرة للازدواج الحراري Thermocouple .

فرق درجات الحرارة [°C]	R*		K*		T*	
	سبيكة من البلاتين – الروديوم (+)	البلاتين (-)	سبيكة تتكون رئيسيا من النيكل والكروم (+)	نيكل (-)	نحاس (+)	نيكل ونحاس (-)
100	0.67		4.095		4.277	
200	1.468		8.137		9.286	
300	2.400		12.207		14.860	
400	3.407		16.395		20.869	
500	4.471		20.640			
600	5.582		24.902			
700	6.741		29.128			
800	7.949		33.277			
900	9.203		37.325			
1000	10.503		41.269			

الجدول ١ – ٩ فرق درجات الحرارة والقوة الدافعة الكهروحرارية للازدواج الحرارى

(وحدة القياس [mV])

* الحروف R , K , T تبين الانواع ، وهي مقسمة تبعا لمادة السلك المعدني للازدواج الحراري .
وكمثال ، الحرف R يشير إلى الازدواج الحراري ذي السلك المعدني المصنوع من سبيكة من البلاتين – الروديوم ، والبلاتين .

أ - المقياس الكهروحراري Thermoelectric thermometer

مما سبق معرفته عن العلاقة بين فرق درجات الحرارة والقوة الدافعة الكهروحرارية نجد أن الازدواج الحراري مع جهاز مللى ڤولتيميتر يمكن استخدامهما معاً كترمومتر (مقياس حرارة). وذلك بقياس العلاقة بين فرق درجات الحرارة والقوة الدافعة الكهروحرارية، وتغيير تدريج الڤولتيميتر من تدريج بالڤولت إلى تدريج بدرجات الحرارة . ومثل هذا الترمومتر يسمى الترمومتر الكهروحراري، وهو يستخدم في قياس درجات الحرارة العالية جدا مثل درجة حرارة فرن كهربائى مثلاً .

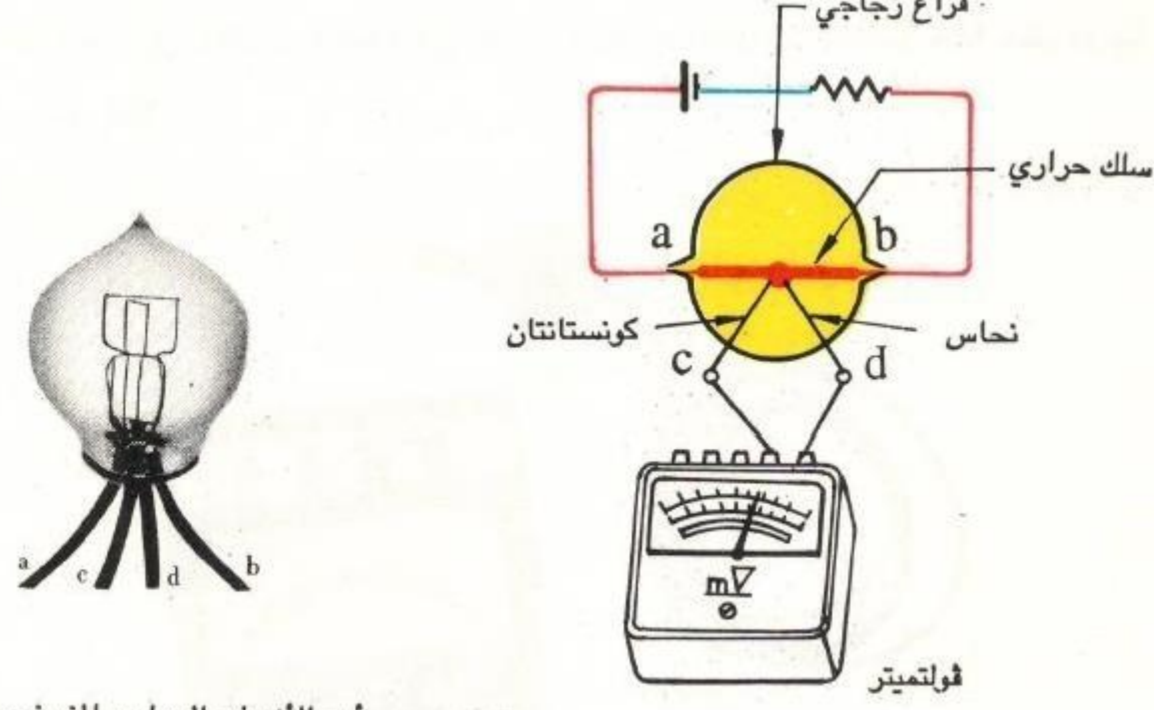


الشكل ١ – ٢٧ الترمومتر الكهروحراري

ب - الأميتر الحراري Thermo - ammeter

في الشكل ١ – ٢٨ نشاهد ازدواجاً حرارياً متصلاً مع سلك حراري في معزل عن الهواء في غلاف زجاجي مفرغ . وكما نرى في الشكل ١ – ٢٨ (ب) يتم توصيل جهاز ڤولتيمتر مع أميتر حراري ليمكننا من قياس شدة التيار المار في السلك الحراري a و b ويكون ذلك كالآتي :

عندما يمر التيار الكهربي في السلك الحراري تتولد طاقة حرارية تتناسب مع مربع شدة التيار كما في قانون چول . وهذه الطاقة ترفع درجة حرارة السلك الحرارى ، وبالتالي وصلة الازدواج الحراري فتتولد قوة دافعة كهروحرارية . هذه القوة الدافعة الكهربائية المتولدة يتم قياسها بواسطة الڤولتيميتر ، فيكون قياس التيار قد تم عن طريق قياس الارتفاع في درجة الحرارة .



أ – الأزدواج الحراري المفرغ من الهواء

ب – دائرة القياس



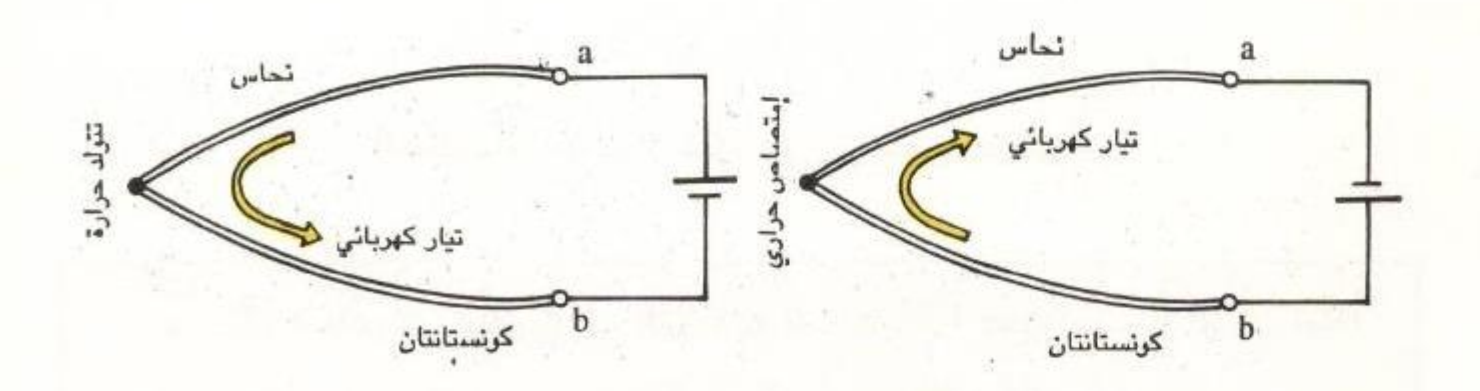
الشكل ١ – ٢٨ الأميتر الحراري

والأميتر الحراري جهاز يقيس شدة التيار عند الترددات العالية* وتسمى أجهزة القياس مثل الأميتر الحراري – والترمومتر الكهروحراري بأجهزة قياس الازدواج الحراري لاعتمادها على الازدواج الحرارى في فكرة عملها .

١ – ٥ – ٢ تأثير بلتـــيير Peltier effect

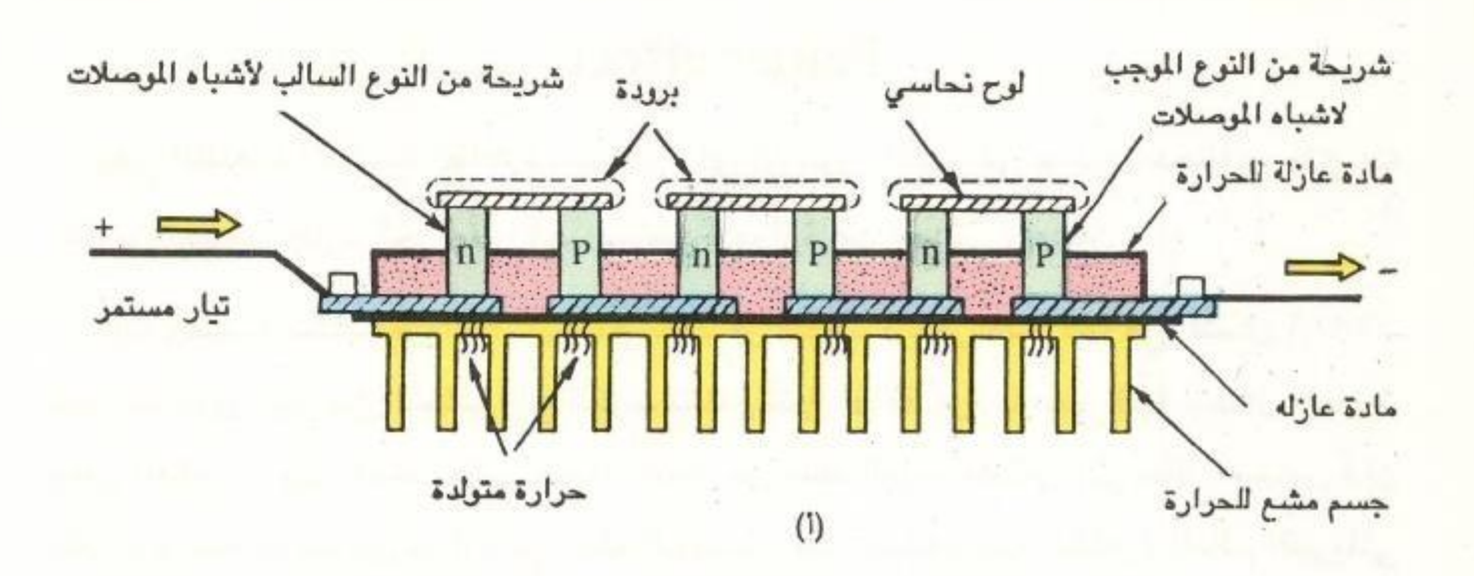
وهي الظاهرة العكسية لظاهرة سيبـك - أي إن مرور التيار في معدنين مختلفين ينتج عنه تأثيرين أحدهما طارد للحرارة والآخر ممتص للحرارة عند وصلتي المعدنين .

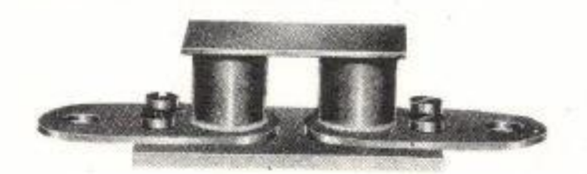
فإذا وصّلنـا سلكـًا من النحـاس مع سـلك من الكونستانتـان مثلا كما في الشكل ١-٢٩؛ فإنه عند مرور تيار من النحاس الى الكونستانتان تتولد طاقة حرارية عند نقطة اتصال المعدنين وعلى العكس . وإذا قمنا بعكس اتجاه التيار من سلك الكونسـتانتان إلى سلك النحاس فإن ذلك ينتج عنه امتصاص حرارة في نقطة التوصيل، وقد اكتشف هذه الظاهرة العالم الفيزيائى الفرنسى بلتـيير (١٧٨٥ - ١٨٤٥م) وسميت باسمه .



الشكل ١-٢٩ ظاهـرة بلتـيير .

عند توصـيل عـدد من أشـباه الموصـلات نوع - p، وأشـبـاه الموصـلات من نوع n **على التوالي بواسطة شرائح من النحاس كما في الشكل ١-٣٠، فإن ذلك يزيد من التـبريد عند سريان تيار في الوصلات، وهذا مـايسمى بالتبريد الإلكتروني ومثل هذا الجـهاز يسـمى جهاز كهروحـراري .





(ب)

الشكل ١-٣٠ جهاز كهرو حراري للتبريد بالكهرباء

* يتأثر قياس شدة التيار في الترددات العالية تأثراً كبيراً بقيمة التردد، ولذا يستخدم جهاز قياس كهروحراري (كالأميتر الحرارى) نظرا لقلة تأثره بالتردد .

** بعض أشباه الموصلات مثل البيزموت(Bi) والأنتيمون (Sb) يتضح فيها تأثير بلتيير بشكل أكبر ، وسوف نقوم بدراسة أشباه الموصلات في الفصل السادس .

١ – ٦ التأثير الكيميائى للتيار الكهربائي والبطارية

من الصعب مرور تيار كهربائي في الماء النقي ؛ لأن مقاومته الكهربائية عالية جدا، ولكن إذا أضفنا بعض الملح إلى الماء وغمسنا فيه قطبين أحدهما موجب والآخر سالب متصلين بمصدر

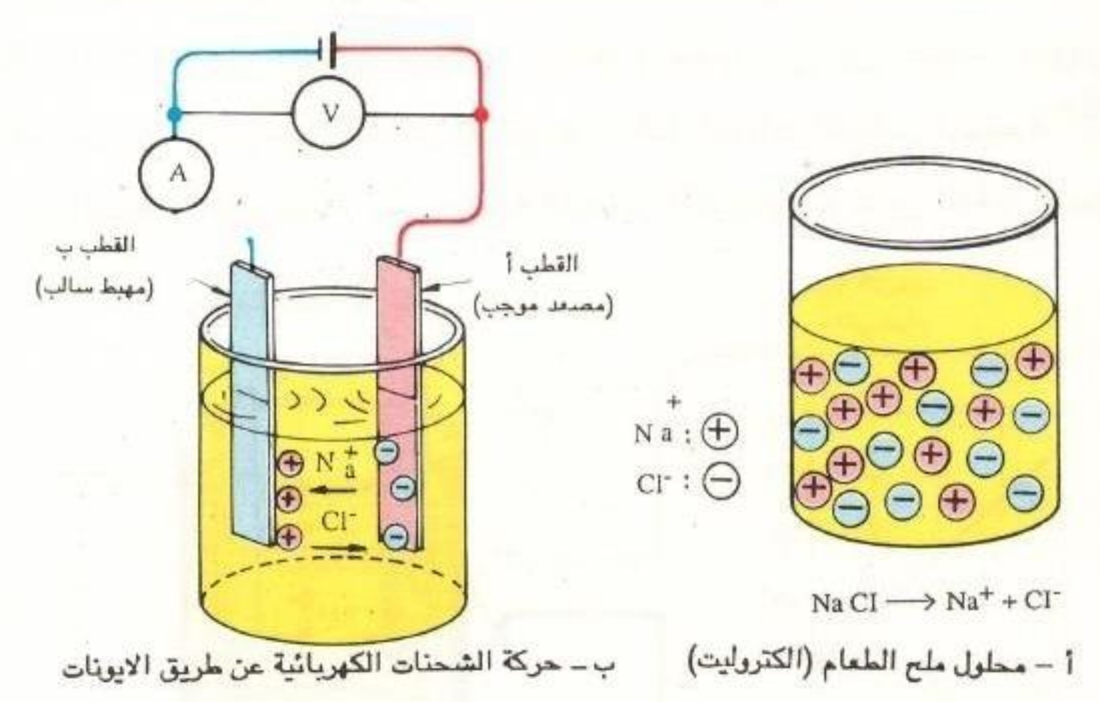
تيار مستمر فسوف يمر تيار في المحلول الملحي، وينتج عن ذلك تفاعلات كيميائية عديدة عند سطح الإلكترود .

١ - ٦ - ١ المحلول الإلكتروليتي والأيونات

Electric Solution and Ions

عند إذابة ملح الطعام (كلوريد الصوديوم Na Cl) في الماء فإن جزئ كلوريد الصوديوم ينقسم الى أيون صوديوم موجب Na^+ وأيون كلور سالب Cl^-.

ويقصد بالتأيّن انقسام الجزيء المتعادل كهربائيا من مادة ما الى جسيم يحمل شحنة موجبة ويسمى كاتيون وآخر يحمل شحنة سالبة ويسمى أنيون ؛ كما في الشكل ١-٣١(أ) والمواد سهلة التأين مثل ملح الطعام يطلق على محلولها في الماء اسم إلكتروليت .



أ - محلول ملح الطعام (الكتروليت)

ب - حركة الشحنات الكهربائية عن طريق الايونات

الشكل ١-٣١ الإلكتروليت والأيونات

عند وضع قطبين من البلاتين في محلول ملح كالموضح في الشكل ١-٣١(أ) وتوصيلهما بمصدر للتيار المستمر، كما في الشكل ١-٣١(ب) فإن القطب الموجب A سوف يجذب

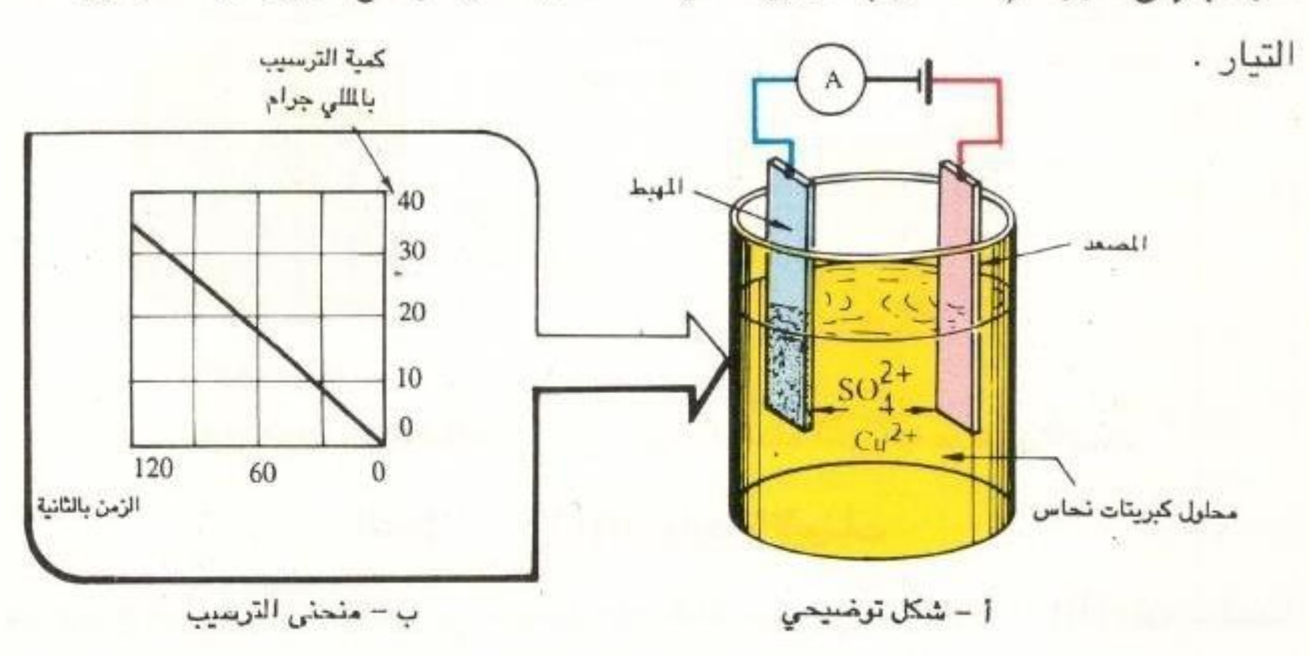
أيونات الكلور السالبة Cl^- ويفقدها إلكتروناتها الزائده حتى تتحول إلى كلور Cl_2 متعادل. والقطب السالب B سوف يجذب أيونات الصوديوم الموجبة, وتكتسب هذه الأيونات شحنات سالبة من القطب تجعلها متعادلة كهربائيًا وتحولها الى صوديوم Na .

وبالتالي يتفاعل الصوديوم مباشرة مع الماء H_2O الموجود في المحلول الإلكتروليتى مكونًا هيدروكسيد الصوديوم Na OH .

ويعتمد التحليل الكهربائي على ظاهرة تحلل الإلكتروليت كيميائيا بواسطة التيار الكهربائي عن طريق التيار الكهربائي المار فيه وهو مجال تطبيقي واسع يشمل الطلاء بالمعادن والترسيب

١ – ٦ – ٢ قانون فاراداي Faraday's law

عند مرور تيار كهربائي في محلول كبريتات النحاس في وجود أقطاب من البلاتين (كما في الشكل ١ – ٣٢) فإن القطب السالب (المهبط) يتحول إلى لون النحاس بمرور الوقت . وهذا التغير يرجع إلى ترسب النحاس الناتج عن تعادل أيونات النحاس الموجبة Cu^{2+} التي تنجذب إلى المهبط (الكاثود)، وتزيد كمية النحاس المترسب مع مرور الوقت أو بزيادة شدة التيار .



الشكل ١ – ٣٢ تجربة الترسيب النحاسى

فإذا كانت شدة التيار المـار هي I أمبير وزمن مروره t ثانية ومقدار المادة المترسبة w جرام فاننا نحصل على العلاقة التالية :

$$w = KIt\ (g) \qquad (1\text{-}31)$$

حيث K ثابت تناسب يعبر عن كمية المادة المترسبة نتيجة لمرور شحنة كهربائية مقدارها 1 كولوم، ويسمى الثابت الكهروكيميائي .

وقد اكتشف فاراداي القانونين التاليين نتيجة لتجاربه التي أثبتت أن كمية المادة المترسبة بالتحليل الكهربائي تتناسب مع كمية الشحنات الكهربائية التي تحملها الأيونات

(١) تتناسب كمية المادة المترسبة مع كمية الشحنات الكهربائية المارة خلال الإلكتروليت .

(٢) عند تساوي كمية الشحنات الكهربائية المارة خلال الإلكتروليت – تتناسب كمية المادة المترسبة بالتحليل الكهربائى مع المكافئ الكيميائي.أى $\frac{\text{الوزن الذري}}{\text{التكافؤ}}$

وهو مايعرف بقانون فاراداي للتحليل الكهربائي .

ميشيل فاراداي (١٧٩١ – ١٨٦٧)

عالم فيزياء وكيمياء بريطانى والده كان يعمل حداداً ، ولد في ضواحى لندن وعمل في تجليد الكتب عندما كان عمره ١٣ عاماً وظهر حماسه للعلم وقراءته للكتب العلمية . وفى الثانية والعشرين من عمره عمل في معهد العلوم الملكى حيث بدأ حياته كعالم . وكان من أوائل أعماله في مجال الكيمياء إسالة الكلور واكتشاف البنزين (وهو زيت خفيف يشتعل بلهب نظيف). وفى عام ١٨٣١ اكتشف ظاهرة الحث الكهرومغناطيسى التي تأسست عليها التقنية الكهربائية الحديثة . وبالإضافة إلى ذلك كانت له إنجازات مهمة مثل اكتشاف قوانين التحليل الكهربائي .

وقد اشتقت وحدة قياس السعة الكهربائية (الفاراد – يرمز له بـ (F)) من اسمه .

ويوضح الجدول ١ - ١٠ قيم الوزن الذري والتكافؤ والمكافئ الكهروكيميائي لعدد من الذرات، ويبين أيضًا الترسيب الناتج عن كمية من الشحنات مقدراها 1 أمبير . ساعة = 3600 كولوم .

الذرة	الأيون	الوزن الذري	التكافؤ	المكافئ الكهروكيميائي [mg/C]	الترسيب [g/(A.h)]
الفضة	Ag^{+}	107.8682	1	1.117975	4.02471
النحاس	Cu^{++}	63.546	2	0.32930	1.1855
النيكل	Ni^{++}	58.69	2	0.3041	1.095
الزنك	Zn^{++}	65.39	2	0.3389	1.220
الصوديوم	Na^{+}	22.989768	1	0.238272	0.85778
الاكسجين	O^{--}	15.9994	2	0.082911	0.29848
الكلور	Cl^{-}	35.4527	1	0.367441	1.32279

الجدول ١ - ١٠ المكافىء الكهروكيميائي

سؤال٢٥

احسب وزن النحاس المترسب (بالجرام) نتيجة لمرور تيار شدته 20 أمبير في محلول كبريتات النحاس لمدة 30 دقيقة .

سؤال٢٦

احسب كمية الشحنة الكهربائية (بالكولوم) اللازمة لترسيب 10 جرامات من الفضة عند إمرارها في محلول نترات فضة .

١ – ٦ – ٣ البطـــاريات Battery

البطارية هـــي أداة تستخدم للحصول على طاقة كهربائية ناتجة من تفاعل كيميائى .

وتنقسم البطاريات الى بطاريات أولية وبطاريات ثانوية . البطاريات الأولية هى البطاريات التي لايمكن إعادة شحنها بعد تفريغ طاقتها الكهربائية أول مرة . أما البطاريات الثانوية فيمكن إعادة شحنها بإعطائها طاقة كهربائية (أي شحنها) من الخارج بعد نفادها .

أ – البطاريات الأوليـــة

حينما نغمس لوحين أحدهما من النحاس (Cu) والآخر من الزنك (Zn) في محلول مخفف لحمض الكبريتيك (كما هو مبين بالشكل ١ – ٣٣) . ثم نوصل اللوحين (القطبين) بأميتر ومصباح صغير ؛ فإننا نشاهد تحرك مؤشر الأميتر وإضاءة المصباح . وسبب هذه الظاهرة * هو أن الزنك ذو قابلية شديدة للتأين ، وهو يذوب في المحلول الإلكتروليتى، ويعطى أيونات موجبة Zn^{++} وتتبقى إلكترونات سالبة $2e^-$ تتحرك في الموصل حتى ينتقل إلى قطب النحاس ذي القابلية الضعيفة للتأين . وتبلغ قيمة القوة الدافعة الكهربائية المتولدة بين القطبين (النحـاس : القطب الموجب ، والزنك : القطب السـالب) نحـو 1.1 ڤولت ، وتسـمى هذه البطارية ببطارية ڤولتـا .

وفي بطارية ڤولتا يقوم أيون الهيدروچين الموجب H^+ فى المحلول الإلكتروليتي بالاتحاد مع الإلكترونات من النحاس باستمرار لنحصل على التفاعل :

$$2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2$$

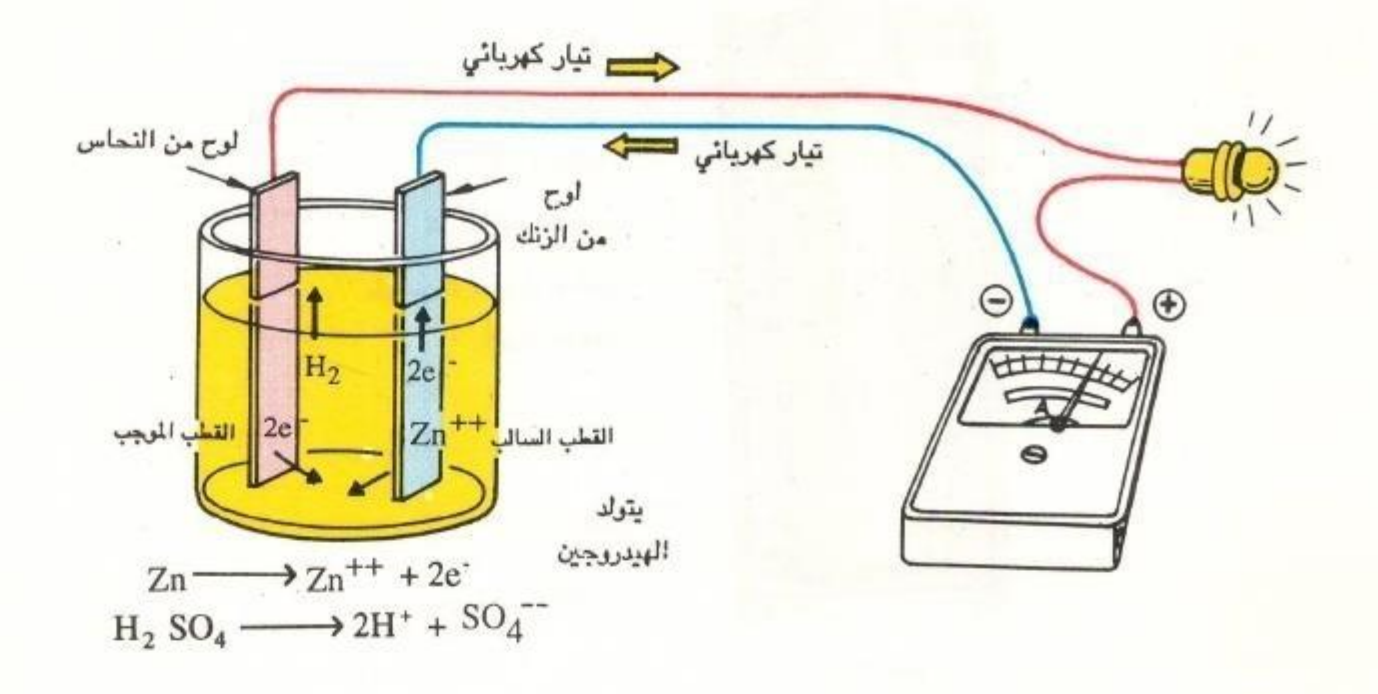
مما ينتج عنه تغطية سطح القطب الموجب بالهيدروچين المتولد ، وهذا الغطاء الهيدروچينى يمنع مرور التيار .

* بعض العناصر الكيميائية مثل الهيدروچين وبعض المعادن لها قابلية للتأين حيث أنه من السهل على هذه العناصر أن تفقد إلكترونات لتصبح أنيونات . والترتيب التصاعدي لقابلية التأين هو : البوتاسيوم K والكالسيوم Ca والصوديوم Na والماغنسيوم Mg والألومنيوم Al والزنك Zn والحديد Fe والنيكل Ni والقصدير Sn والرصاص Pb و(الهيدروچين) (H)، والنحاس Cu والزئبق Hg والفضة Ag والبلاتين Pt والذهب Au والكربون (C) .

إلساندرو ڤولتا

عالم كهروكيماويات إيطالي ولد من عائلة في كومو بشمال إيطاليا. كان مهتمًا بدراسة الكيمياء والكهرباء، وقد قام بدراسة فرق جهد التوصيل بين موصل مبتل ومعدن ، وفى عام ١٧٩٩ ابتكر العامود الڤولتي الذي جعل أول تيار من صنع الإنسان يسري في سلك وفى عام ١٨٠٠ نشر بحثًا عن البطارية كان طفرة جديدة في مجال الكهرباء وقد تولى منصب الرئيس الشرفى لقسم العلوم بجامعة باڤيا Pavia واستمر في ابحاثه حتى وافته المنية في معمله بمدينة كومو عام ١٨٢٧م.

ووحدة قياس فرق الجهد (وهي الڤولت) مشتقة من اسمه .



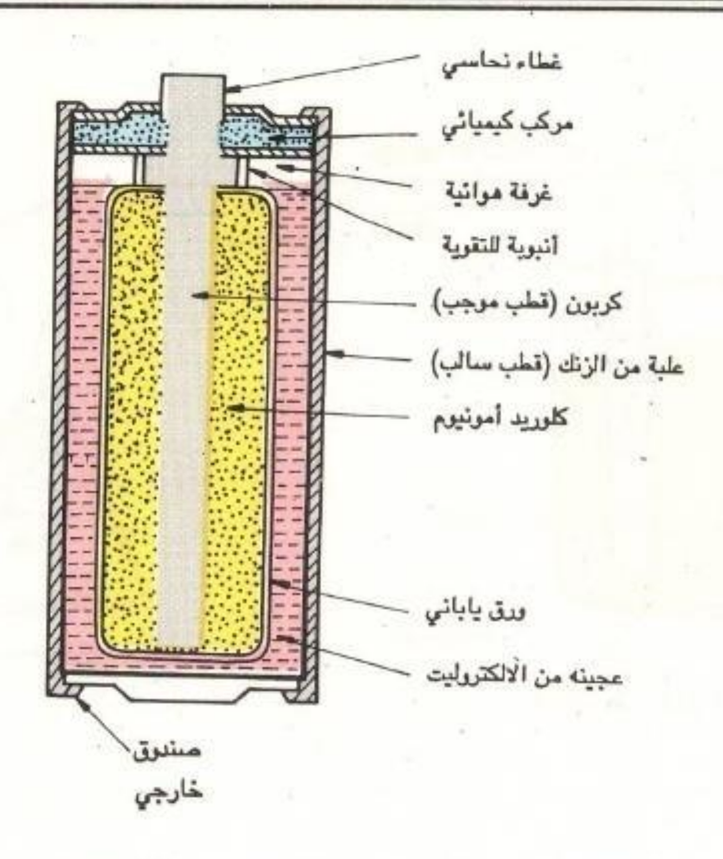
الشكل ١ – ٣٣ الخلية الڤولتية Voltaic cell

القوة الدافعة الكهربائية المسببة لانخفاض القوة الدافعة الكهربائية في الخلية تعرف بظاهرة الاستقطاب .

ولمنع الاستقطاب يتم تحويل الهيدروچين المتكون على سطح القطب إلى ماء عن طريق إضافة عامل مؤكسد إلى الإلكتروليت . ويسمى هذا العامل المؤكسد بمانع الاستقطاب .

ومن أمثلة موانع الاستقطاب أكاسيد المعادن مثل ثاني أكسيد المنجنيز.

وفى الوقت الحاضر انتشر استعمال بطاريات الماغنسيوم الجافة، المبينة في الشكل ١ – ٣٤، وفيها يستخدم عمود من الكربون كقطب موجب واسطوانة من الزنك كقطب سالب، ويستخدم كلوريد الأمونيوم NH_4Cl كإلكتروليت حيث يتم خلطه مع النشا لعمل عجينة . كما يستخدم ثاني أكسيد المنجنيز كمانع للإستقطاب .



الشكل ١ - ٣٤ بطارية الماغنسيوم الجافة

وتوضح المعادلات الكيميائية التالية التفاعلات التي تتم في بطاريات الماغنسيوم الجافة .

القطب السالب :

$$Zn \longrightarrow Zn^{++} + 2e^-$$

$$Zn^{++} + 4NH_4^{\ +} \longrightarrow \{Zn(NH_3)_4\}^{++} + 4H^+$$

عند القطب الموجب :

$$4H^+ + 3MnO_2 + 4e^- \longrightarrow Mn_3O_4 + 2H_2O$$

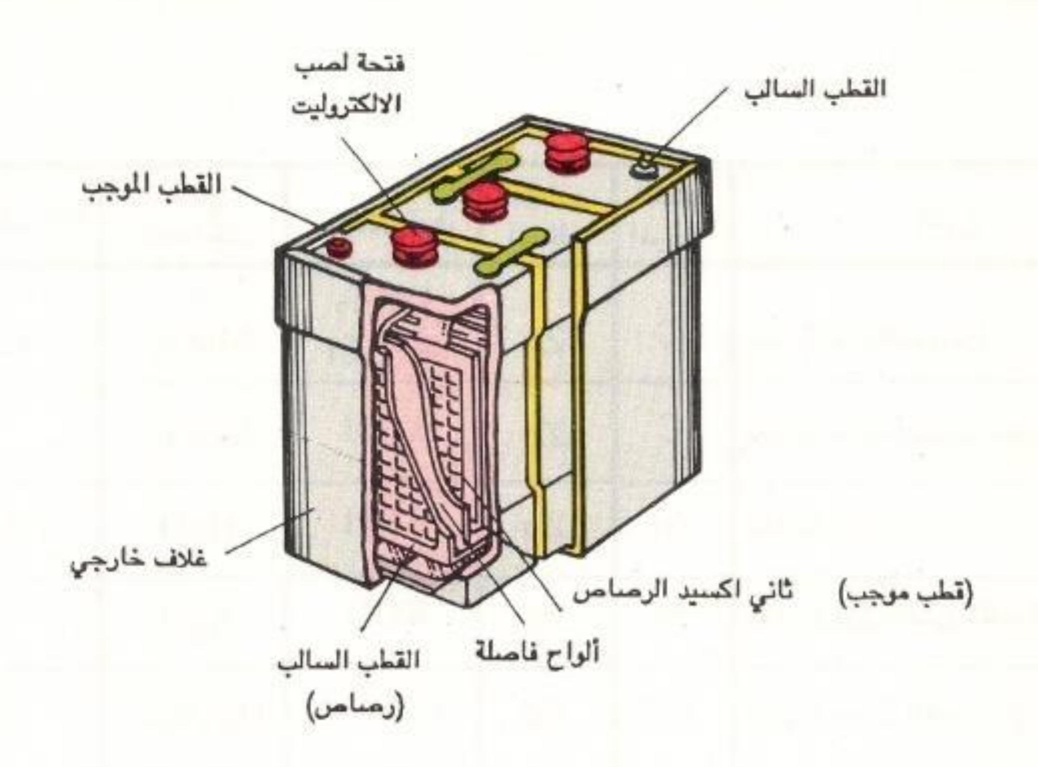
ويوضح الجدول ١ - ١١ أنواع البطاريات الجافة مقسمة حسب نوع الإلكترود والإلكتروليت ومانع الاستقطاب .

النوع	القطب الموجب	القطب السالب	الإلكتروليت	مانع الاستقطاب	القوة الدافعة الكهربائية
بطارية جافة(منجنيز)	C	Zn	$ZnCl_2$ NH_4Cl	MnO_2	1.5 ~ 1.7
بطارية جافة (منجنيز قلوي)	C	Zn	KOH	MnO_2	1.4
بطارية (زئبق)	Ni	Zn	KOH	HgO	1.34 ~ 1.35
بطارية فوق أكسيد الفضة (فضة)	Ag	Zn	KOH	AgO	1.7
بطارية وستن (القياسية)	Hg	Cd	$CdSO_4$	Hg_2SO_4	1.0183

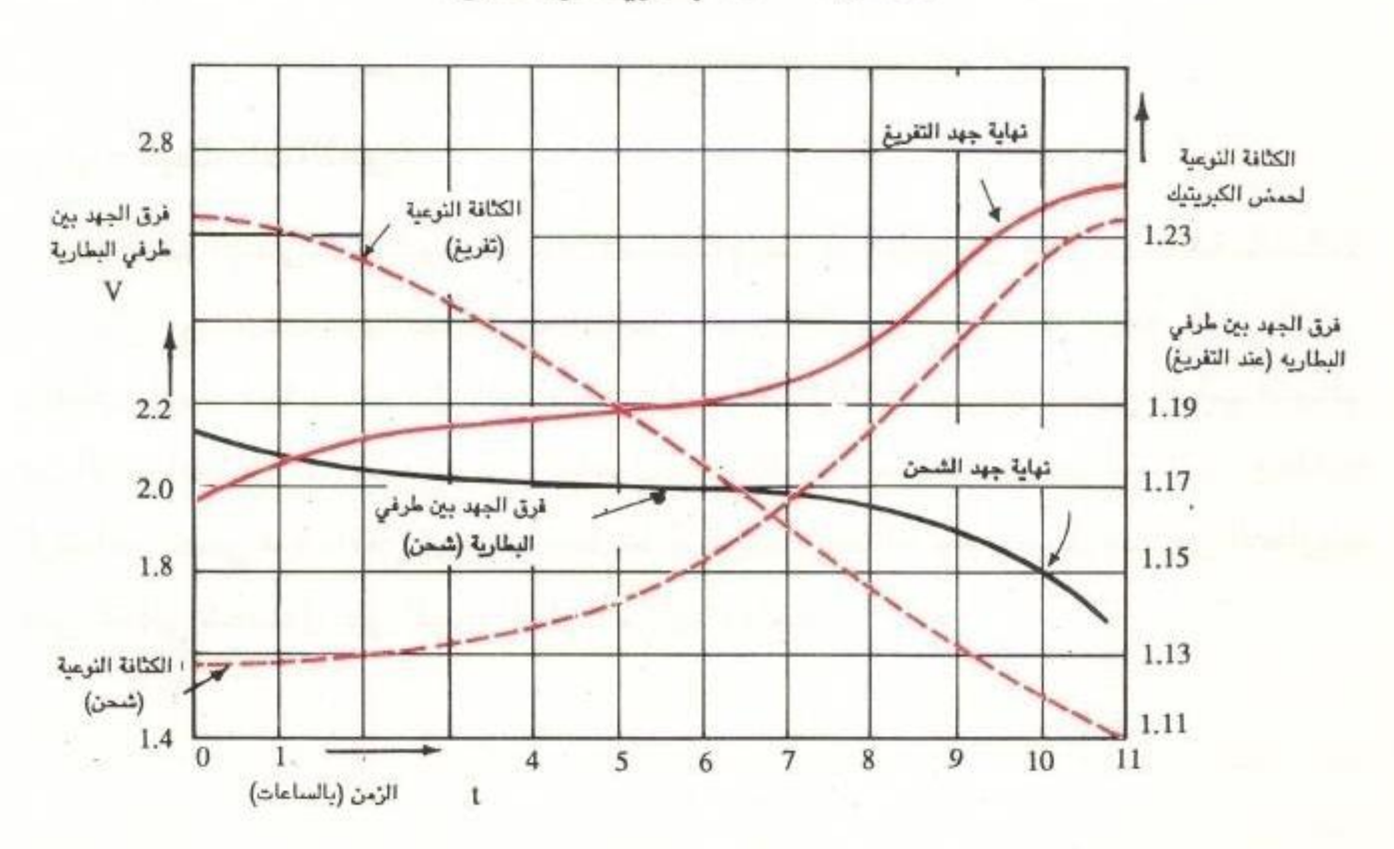
الجدول ١ – ١١ أنواع مختلفة من البطاريات الأولية

ب – البطاريات الثانوية

من أمثلة البطاريات الثانوية شائعة الاستخدام بطارية الرصاص وهي موضحة بالشكل ١ – ٣٥ . ويستخدم فيها محلول مخفف من حمض الكبريتيك ذى كثافة نوعية 1.2 - 1.3 . والقطب الموجب بها يصنع من ثاني أكسيد الرصاص PbO_2 في حين يصنع القطب السالب من الرصاص Pb ويوضع فيها فاصل لمنع تلامس القطبين الموجب والسالب . وبطارية الرصاص تعطي قوة دافعة كهربائية مقدارها 2 ڤولت؛ وأحياناً يتم توصيل عدد من البطاريات على التوالي للحصول على الجهد المطلوب في وعاء واحد .



الشكل ١ – ٣٥ بطارية الرصاص



الشكل ١ – ٣٦ منحنى العلاقة بين جهد البطارية والزمن

أثناء شحن وتفريغ بطارية الرصاص .

ويكون التغير الكيميائى في البطارية كما يلي :

سالب إلكتروليت موجب تفريغ سالب . إلكتروليت موجب

$$PbO_2 + 2H_2SO_4 + Pb \rightleftarrows PbSO_4 + 2H_2O + PbSO_4$$

شحـــن

ويوضح الشكل ١ – ٣٦ تغير جهد البطاريات مع الزمن أثناء شحن وتفريغ البطارية . وكما هو واضح في الشكل فإن التفريغ المستمر للبطارية يحوّل الرصاص الموجود في كل من اللوحين إلى كبريتات رصاص مما يؤدي إلى تخفيف محلول حمض الكبريتيك، ويقلل من القوة الدافعة الكهربائية تدريجيا .

لهذا يجب أن تتم إعادة الشحن عندما يصل جهد البطارية الى 1.8 ڤولت وتخفض الكثافة النوعية إلى 1.15.

ويسمى هذا الجهد بجهد التفريغ النهائي، وحينما يصل الجهد أثناء الشحن إلى 2.7 ڤولت فإن الاستمرار في الشحن لايؤدي إلى زيادة في الجهد ، وإنما يتولد عنه أكسچين من القطب الموجب وهيدروچين من القطب السالب . ويسمى هذا الجهد بجهد الشحن النهائي .

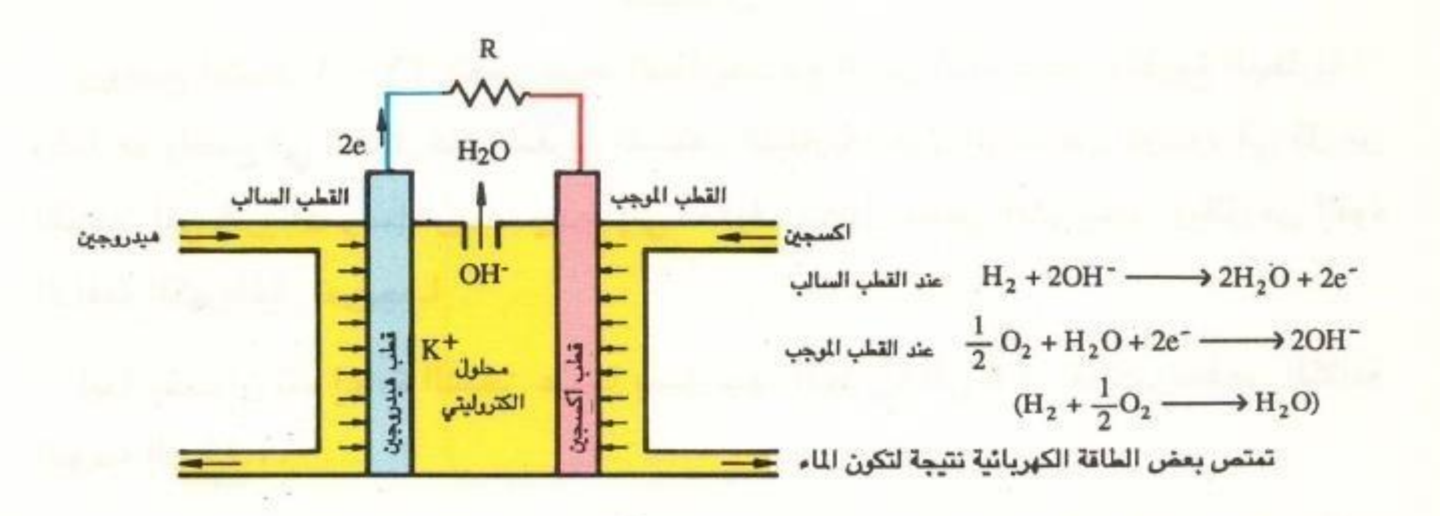
ويتم التعبير عن سعة البطارية بحاصل ضرب شدة التيار عند التفريغ في الزمن . ووحداتها الأمبير ساعة ويرمز لها بـ A.h فعلى سبيل المثال إذا تم التفريغ بتيار شدته 10 أمبير لمدة 10 ساعات فإن سعة هذه البطارية تبلغ 100 أمبير . ساعة .

حـ – البطارية القلوية Alkali battery

وفيها يستخدم محلول قلوي مثل هيدروكسيد البوتاسيوم KOH كإلكتروليت . ومن أمثلتها النيكل كادميوم، وهى بطاريات واسعة الانتشار صلبة ، ويمكن إعادة شحنها كما أنها سهلة الحمل أيضا.

د – الخلية التى تعمل بالوقــود Fuel cell

يمكن استخدام الطاقة المختزنـة في الوقود وتحويلها مباشرة إلى طاقة كهربائية من خلال التفاعل الكيميائى في هذه الخلية. وعند مقارنتها بالبطاريات العادية ، نجد أنها أقل فقداً للطاقــة .



الشكل ١ – ٣٧ خلية تعمل بالوقود هيدروچين – أكسچين

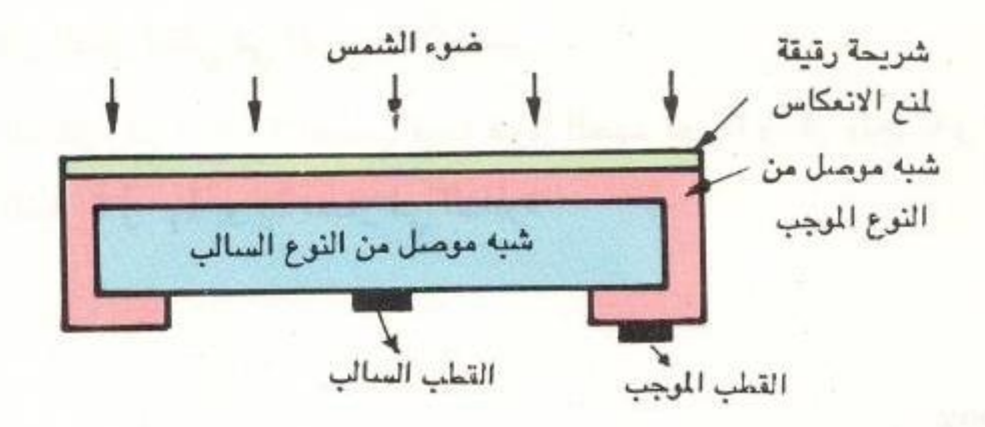
ويبين الشكل ١ – ٣٧ خلية تعمل بوقود الهيدروچين ، ويستخدم فيها الأكسچين كمساعد على الاحتراق . وتستخدم أقطاب مساميـة موجبة وسالبة موضوعة بحيث تحصر بينها الالكتروليت . والالكتروكيت في هذه الحالة يتكون من محلول من هيدروكسيد البوتاسيوم KOH ، ويتم إضافة الأكسچـين الى القطب الموجب،والهيدروچـين الى القطب السالب من الخارج ، وتبلغ قيمة القوة الدافعة الكهربائية المتولدة نحو 1 ڤولت وكفاءة تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية حوالى 60 - 70% . وقد استخدمت مثل هذه الخلايا في سفن الفضاء ومكوك الفضـاء .

يعبر عن سعة بطاريات الرصاص المستخدمة في السيارات بمعدل الـ 20 ساعة .

ويبلغ قيمة فرق الجهد في متوسط 20 ساعة نحو 12 فولت، ويبلغ جهد التفريغ النهائي حوالى 10.5 فولت .

هـ - الخلية الشمسية Solar cell

تقوم الخلية الشمسية بتحويل ضوء الشمس مباشرة الى طاقة كهربائية عن طريق أشباه الموصلات ، ويوضح الشكل ١ – ٣٨ دائرة توصيل الخلية الشمسية باستخدام صمام ثنائي مصنوع من تلامس قطعتين من السليكون إحداهما من النوع الموجب والاخرى من النوع السالب .



الشكل ١ – ٣٨ الخلية الشمسية المصنوعة من السليكون

تبلغ طاقة مثل هذه الخلية 100 وات لكل متر مربع، وكفاءة تحويل الطاقة الضوئية الى كهربائية نحو 10 - 15%. وبالإضافة إلى ذلك تجرى الآن أبحاث بغرض إيجاد خلايا جديدة لها كفاءة تحويل أعلى مثل خلية تعمل ببللورات من كبريتيد الكادميوم Cd S .

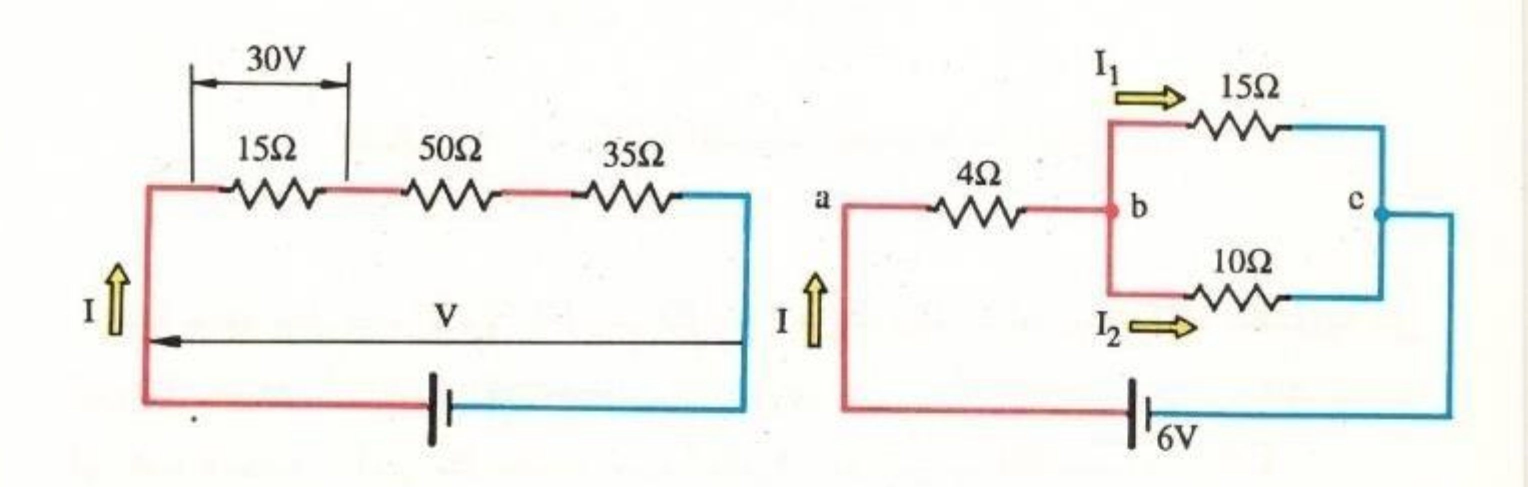
تمـــارين

١ - إذا كـان عندك مـوصل طوله 1 متر ومقـاومته 3 أوم ، احـسب مقـاومـة الموصل إذا تضاعف طوله نتيجـة للشـد . ثم احسب قيمة القطـر الجديد بعد الشـد .

٢ - احسب المقاومـــة المكافئـة والتيار المار في الدائرة حينمـا يكون هناك مقاومتان 5 و 10 أوم متـصلتـان على التوالى بمصـدر جهـده 30 ڤولت ثم إحسب فرق الجـهد بين طرفى المقاومـة 5 أوم .

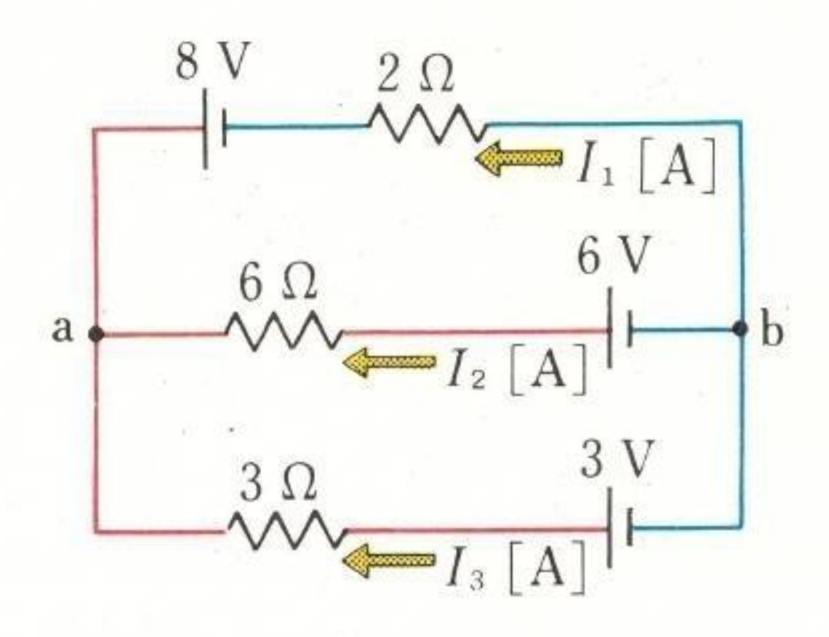
٣ - بفـرض أن هناك دائـرة مكونة من 3 مقـاومات 2 أوم و 5 أوم و 10 أوم على التـوازي ، احسب شـدة التيار المـار في كـل مقـاومـة، وفرق جهـد المصدر الكهربائي إذا كان التيار الكلي في الدائرة 50 أمبير .

٤ - فى الشكل رقم ١ - ٣٩ احسب قيمة فـرق الجهد بين b و a وبين c و b واحسب قيمة التيار I و I_1 و I_2 المـار في الدائرة .



الشكل ١ - ٤٠

الشكل ١ - ٣٩



الشكل ١ – ٤١

٥ – في الشكل ١ – ٤٠ إذا كان فرق الجهد بين طرفي المقاومة 15 أوم مقداره 30 ڤولت عندما يكون فرق الجهد بين المقاومات الثلاث المتصلة على التوالي V ڤولت ، احسب التيار (I) المار في الدائرة وقيمة فرق الجهد V .

٦ – في الشكل ١ – ٤١ احسب شدة التيارات I_1 و I_2 و I_3 المارة في كل فرع .

الفصل الثانى

التيار الكهربائي والمغناطيسية

Electric Current and Magnetism

من الظواهر الكهربائية المعروفة أن المغناطيس يجذب قطع الحديد، كما أن القضيب المغناطيسى عند تعليقه في الهواء يتجه من الجنوب إلى الشمال. وعند تقريب مؤشر مغناطيسى إلى موصل به تيار جار فإن المؤشر يتأرجح . وتظهر المغناطيسية في المنطقة المحيطة بالتيار المار في موصل معين. كما أن تعرّض الموصل المار به تيار، والموضوع في مجال مغناطيسي، لقوة معينة فإن هذه القوة تؤثر عليه . والمحرك المستخدم في السيارات والغسالات الكهربائية هو تطبيق لهذه الظاهرة .

كذلك عند تحريك موصل معين في مجال مغناطيسى تتولد قوة دافعة كهربائية في هذا الموصل . وتستخدم هذه الظاهرة في توليد الكهرباء في محطات توليد الكهرباء . كما أنه عند تغيير المجال المغناطيسي في ملف تتولد قوة دافعة كهربائية في الملف، ويعد محول الجهد هو تطبيق لهذه الظاهرة.

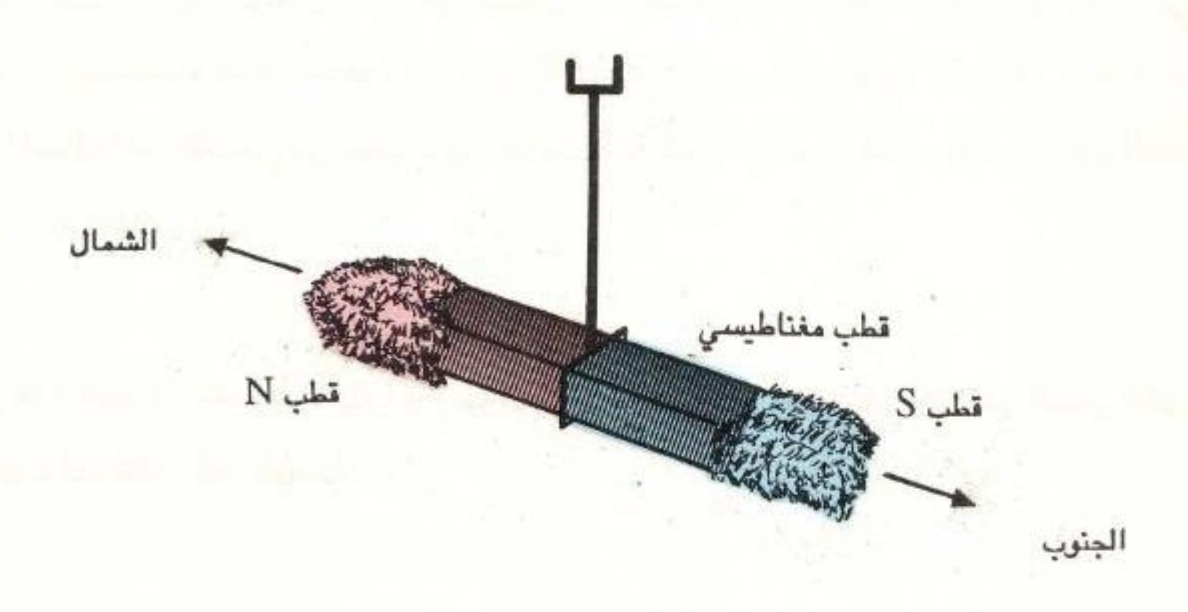
فى هذا الفصل نقوم أولاً بدراسة خواص المغناطيس ثم نبحث في وظائف التيار الكهربائي والوظائف المختلفة المغناطيسية .

٢ – ١ المغناطيس وقانون كولوم Coulomb's law

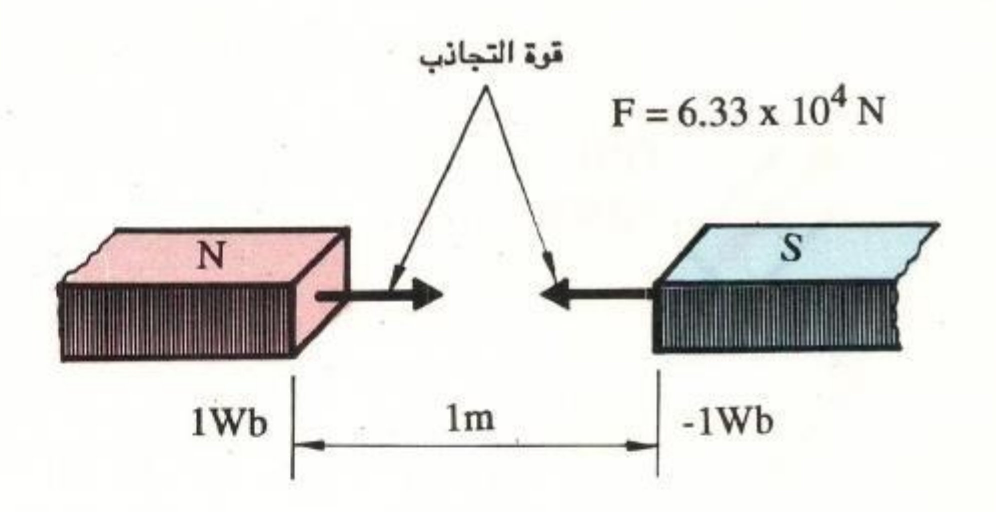
٢ – ١ – ١ المغناطيس والمغناطيسية Magnet and magnetism

يوجد من المغناطيس أنواع طبيعية مثل الماجنيتايت وأنواع صناعية مثل القضيب الممغنط على شكل حرف U والإبرة المغناطيسية . ومن المعروف أن هذه المغناطيسات تجذب قطع الحديد وأن الإبرة المغناطيسية تبين اتجاه الجنوب والشمال . وهذه الخواص للمغناطيس تسمى الخواص المغناطيسية .

عند رش برادة الحديد على قضيب ممغنط فإنها تنجذب بشدة إلى طرفى المغناطيس كما في الشكل ٢ – ١ ، وذلك لأن أقوى جزء للمغناطيس يوجد عند طرفي المغناطيس أى أقطاب المغناطيس . والمغناطيس له دائمًا قطبان مغناطيسيان قطب مغناطيسى في اتجاه الشمال يسمى قطب N ، أو القطب الموجب ؛ وقطب مغناطيسى آخر في اتجاه الجنوب ويسمى قطب S ، أو القطب السالب .



الشكل ٢ – ١ الأقطاب المغناطيسية Magnetic poles



الشكل ٢ – ٢ القوة المغناطيسيـة Magnetic Force

يبين الشكل ٢ – ٢ أنه عند تقريب القطب الشمالى (N) من القطب الجنوبى (S) لمغناطيس آخر تحدث قوة تجاذب بينهما، أما إذا كان القطبان متشابهين تحدث قوة تنافر . وبمعنى آخر الأقطاب المختلفة تتجاذب والأقطاب المتشابهة تتنافر . تسمى هذه القوى (القوى المغناطيسية) .

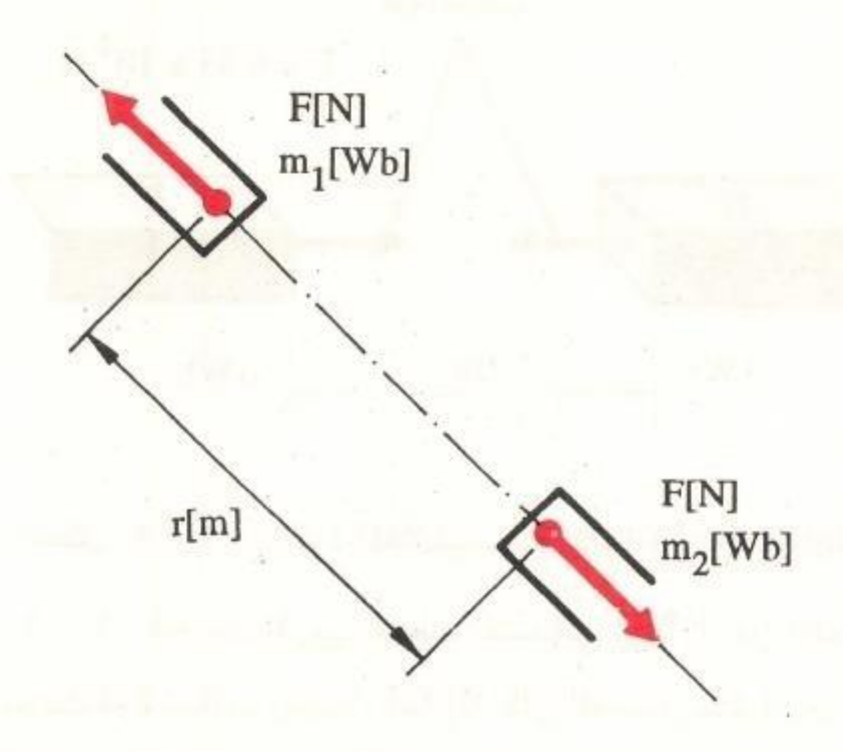
وحدة قياس شدة القطب المغناطيسى هي الويبر، ويرمز لها بالرمز [Wb] . وشدة 1 ويبر في قطب مغناطيسي هي قوة مغناطيسية قيمتها $6.33X10^4$ نيوتن تؤثر على قطبين مغناطيسيين المسافة بينهما 1 متر ولهما الشدة نفسها في الفراغ .

٢ – ١ – ٢ قانون كولوم

نفترض أن لدينا قطبين مغناطيسيين قوتهما m_1 [Wb] , m_2 [Wb] والمسافة بينهما [m] r كما فى الشكل ٢ – ٣ ، يكون اتجاه القوة المغناطيسية F [N] بينهما على الخط المستقيم الواصل بين القطبين، وتكون قيمة هذه القوة المغناطيسية كما يلي :

$$F = \frac{1}{4 \pi \mu} \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad [N] \qquad (2-1)$$

وتسمى هذه العلاقة قانون كولوم .



الشكل ٢ – ٣ قانون كولوم للمغناطيسية

وتكون قوة القطب المغناطيسى m [Wb] موجبة في حالة قطب شمالى (N) ، وتكون سالبة في حالة قطب جنوبى (S) . وتؤدى القوة المغناطيسية F(N) إلى تنافر إذا كانت موجبة، وإلى تجاذب إذا كانت قيمتها سالبه .

الثابت μ (النفاذية) يتحدد بنوع الوسط الموجود فيه القطب المغناطيسى . وفى الفراغ نجد أن $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m] ، ويمكن كتابة المعادلة (2-1) في الفراغ كما يلي :

$$F = \frac{1}{4\pi\mu_o} \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6.33 \times 10^4 \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad [N] \qquad (2-2)$$

مثال ١

اذا وضع قطبان مغناطيسيان قوتهما 2×10^{-6} ويبر ، 5×10^{-6} ويبر في الهواء، وكانت المسافة بينهما 3 سم ، احسب القوة المغناطيسية المؤثرة عليهما .

الحـــل

نقوم بالتعويض في المعادلة (2-2) بالقيم الآتيـة :

$$m_1 = 2 \times 10^{-6}\ Wb, \quad m_2 = 5 \times 10^{-6}\ Wb, \quad r = 0.03\ m$$

فنحصل على :

$$F = 6.33 \times 10^4 \times \frac{2 \times 10^{-6} \times 5 \times 10^{-6}}{(0.03)^2} = 7.03 \times 10^{-4} \quad [N]$$

سؤال ١

إذا وضع قطبان مغناطيسيان قوتهما 1×10^{-6} ويبر ، 3×10^{-6} ويبر في الهواء، وكانت المسافة بينهما 10سم . احسب القوة المغناطيسية المؤثرة عليهما .

٢ – ١ – ٣ الحث المغناطيسى Magnetic induction

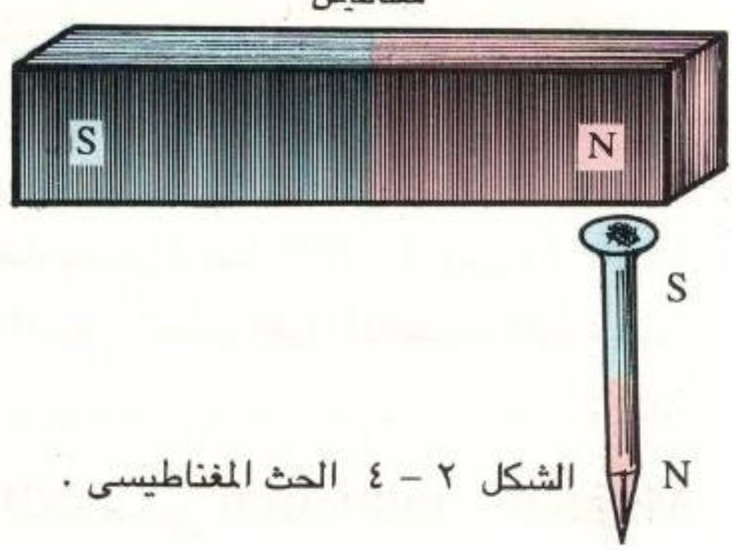
عند وضع قطعة حديدية مثل المسمار بالقرب من القطب الشمالى لمغناطيس يظهر بالقطعة الحديدية قطب جنوبي في النهاية القريبة من المغناطيس، ويظهر قطب شمالى في الطرف البعيد عن المغناطيس كما في الشكل ٢ – ٤ . وتسمى هذه الظاهرة الحث المغناطيسى . أي إن القطعة الحديدية قد تمغنطت . ونتيجة الحث المغناطيسى انجذبت القطعة الحديدية إلى المغناطيس بسبب قوة التجاذب بين القطب (S) الذى ظهر على القطعة الحديدية وقطب (N) للمغناطيس .

تسمى المواد مثل الحديد والنيكل مواداً حديدية مغناطيسية ، وهى مواد قابلة للمغنطة باستخدام الحث المغناطيسى . وسوف ندرس ذلك في الفصل الثالث بالتفصيل.

٢ - ١ - ٤ المجال المغناطيسى وشدة المجال المغناطيسى

عند وضع مغناطيس بالقرب من مغناطيس آخر، أو بالقرب من قطعة حديدية تظهر القوة المغناطيسية، ولهذا يسمى الحيز الذي تعمل فيه القوة المغناطيسية بالمجال المغناطيسى .

عند وضع قطب موجب قوته 1 ويبر في مجال مغناطيسى كما في الشكل ٢ - ٦ (أ) فإن شدة المجال المغناطيسي واتجاهه* عند نقطة معينة يعبر عنه بقيمة واتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على هذا القطب مع ملاحظة أن النفاذية في الهواء تساوي تقريباً μ_0 .



الشكل ٢ - ٤ الحث المغناطيسى .

المغناطيسية الأرضية Earth magnetism

تتجه الإبرة المغناطيسية دائماً بالقرب من إتجاه الجنوب والشمال، وذلك بسبب القوة المغناطيسية التي تؤثر على الإبرة وعلى الأرض (وهي مغناطيس كبير جداً) . والكرة الأرضية هي مغناطيس هائل له قطبان أحدهما بالقرب من القطب الشمالى الجغرافى (قطب S) ، والآخر بالقرب من القطب الجنوبي الجغرافي (قطب N) .

وعلى الأرض يوجد مجـال مغناطيسى وفيـه يخرج خط القوة المغناطيسية من قطب N ويتجه إلى قطب S . وهذه تسمى المغناطيسية الأرضية، وبوصلة التوجيه ما هي إلا تطبيق لهذه الخاصية للمغناطيسية .



الشكل ٢ – ٥ المغناطيسية الأرضية

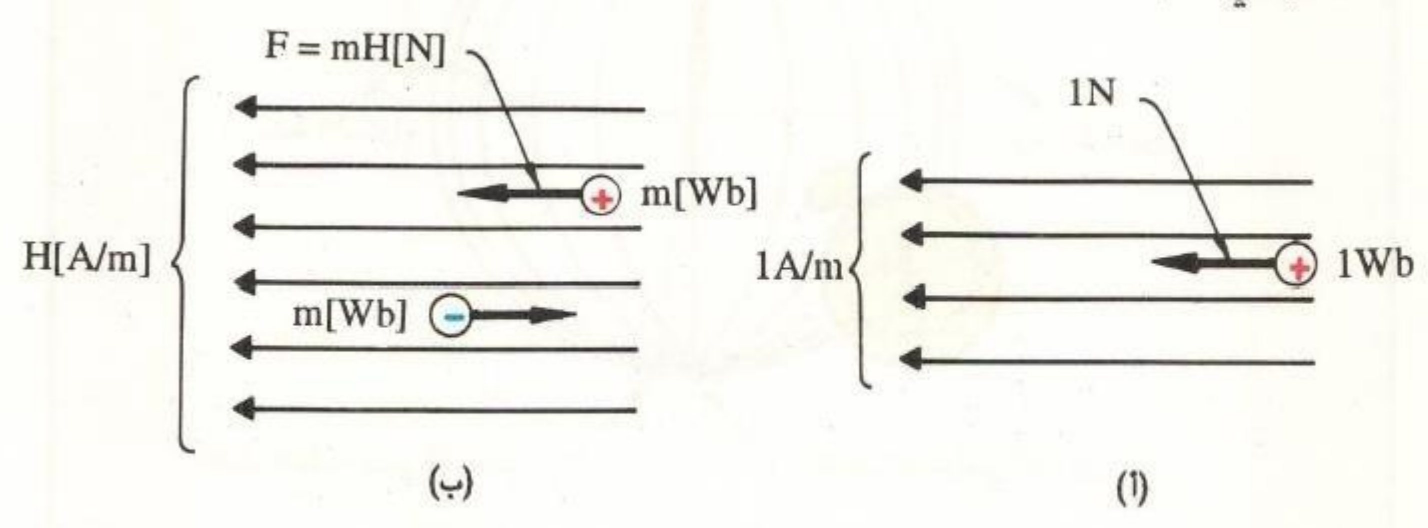
هناك فـرق بين مـوقع القطب المغناطيسى الأرضى والقطب الجـغرافى المجـاور له ، ويخـتلف اتجـاه الخطوط المغنـاطيـسيـة المارة بالنقط المختلفـة على سطح الأرض عن الاتجاهات إلى الأقطاب الجغرافية

وحدة قياس شدة المجال المغناطيسى هي أمبير / متر ، ويرمز لها بالرمز [A/m] **. والشدة 1 أمبير / متر هي شدة المجال المغناطيسى الذي إذا وضـع فيـه قطب مغناطيسى قوته 1 ويبر أثرت عليه قوه مغناطيسية قيمتها 1 نيوتن .

عند وضع قطب مغناطيسى قوته [m [Wb فى مجال مغناطيسى شدته [H[A/m كما في الشكل ٢ – ٦ (ب) فإن القوة المغناطيسية [F [N التى تؤثر على القطب يمكن حسابها من المعادلة التالية.

$$F = m H \quad [N] \qquad (2-3)$$

وإتجاه هذه القوة المغناطيسية هو نفسه اتجاه المجال المغناطيسى إذا كان القطب المغناطيسى موجبًا، ويكون إتجاهها معاكسًا لاتجاه المجال المغناطيسي إذا كان القطب المغناطيسي سالبًا .



الشكل ٢ – ٦ شدة المجال المغناطيسى

سؤال٢

إذا كانت القوة المؤثرة على قطب مغناطيسى قوته 5×10^{-3} ويبر هي 3×10^{-2} نيوتن في الهواء . احسب شده المجال المغناطيسى في هذه النقطة .

٢ – ١ – ٥ خطوط القوى المغناطيسية

لاترى خطوط المجال المغناطيسى بالعين المجردة . ولكن مثلاً إذا قمنا برش بودرة الحديد حول قضيب مغناطيسي ؛ فإن بودرة الحديد تنتظم كما في الشكل ٢–٧ .

* شدة المجال المغناطيسى هي كمية متجهة لها قيمة واتجاه . ومع ذلك فإن قيمة شدة المجال المغناطيسى يطلق عليها عادة الشدة . وسوف نتبع هذا في النص .

** استخدام [A/ m] ، أي التيار لكل 1 متر كوحدة قياس المجال المغناطيسي هي تعميم للحقيقة القائلة إن شدة المجال المغناطيسى الناتج من التيار الكهربائي يتناسب مع التيار .

وتخيل شكل المنحنى المشابه للخط المرسوم بواسطة بودرة الحديد يساعدنا في التعرف على شكل خطوط المجال المغناطيسى . وهذا المنحنى التخيلى يسمى خط القوة المغناطيسية ، وله الخواص الآتية (انظر الشكل ٢ – ٨) :

١ – يخرج خط القوة المغناطيسية من قطب N للمغناطيس ، وينتهي عند قطب S .

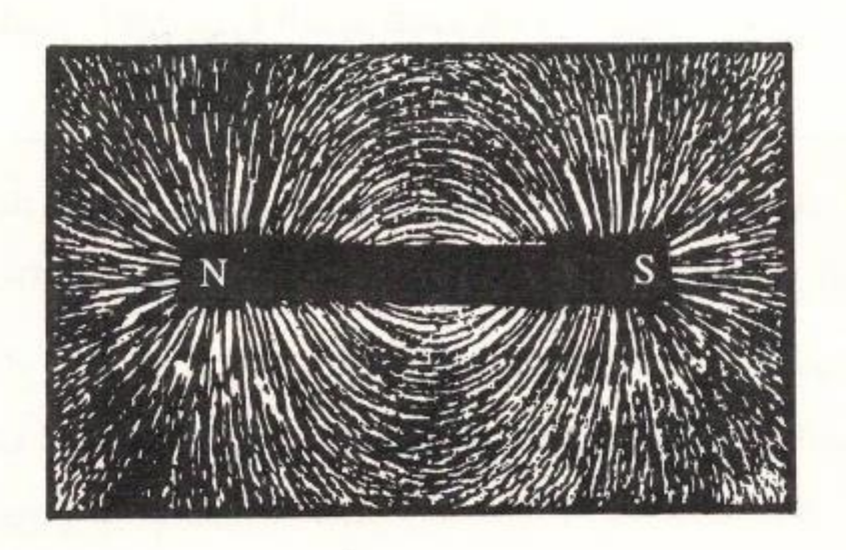
٢ – خط القوة المغناطيسية يميل إلى الانكماش مثل الوتر المطاطي المشدود وله خاصية التنافر مع أي خط آخر في الاتجاه نفسه .

٣ – خطوط القوى المغناطيسية لايعترض بعضها البعض ولاتتقاطع .

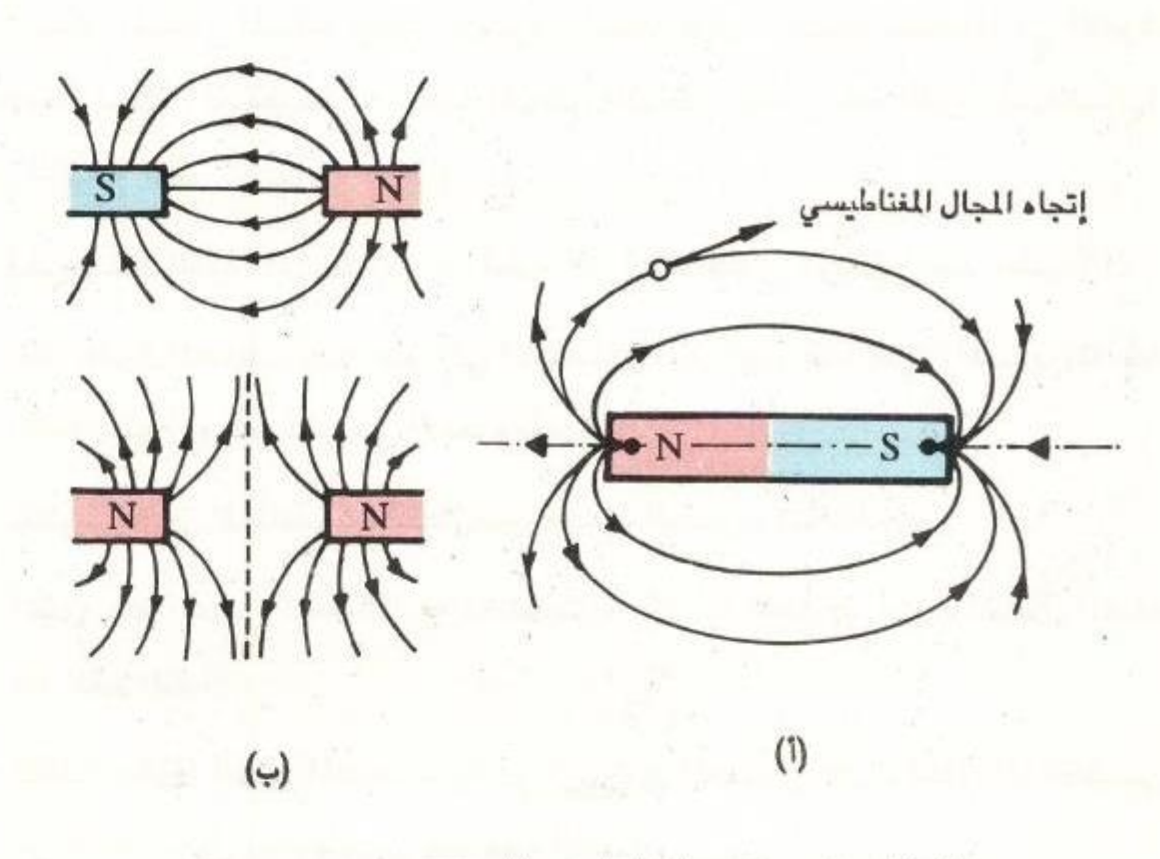
٤ – اتجاه خط المماس لخط القوى المغناطيسية عند أية نقطة هو اتجاه المجال المغناطيسي عند هذه النقطة .

٥ – كثافة خطوط القوى المغناطيسية في المستوى العمودي على المجال المغناطيسى تعبر عن شدة المجال المغناطيسى عند هذه النقطة .

٦ – عند قطب مغناطيسى قوته الوحدة ($\pm 1Wb$) يكون عدد خطوط القوى المغناطيسية التي تخرج منه أو تدخل فيه يساوي ($1/\mu$) .



الشكل ٢ – ٧ المجال المغناطيسي لقضيب ممغنط



الشكل ٢ – ٨ خطوط القوى المغناطيسية وتوزيعاتها

أندريه ماري أمبير

هو عالم فيزياء فرنسى فقد والده خلال الثورة الفرنسية، وعاش حياة غير سعيدة . في عام ١٨١٩ أصبح أستاذاً في جامعة باريس .

فى عام ١٨٢٠ نشر القانون المسمى بقانون أمبير الذي يعطي التأثير المتبادل بين الموصلات التي يمر فيها تيار . وقام بشرح مغناطيسية المادة على أساس أن تأثير المغناطيس يشبه تأثير التيار الكهربائي . وقد أسهمت أبحاثه في تأسيس القوانين الأساسية للتيار الكهربائي والمغناطيسية

وحدة قياس التيار الكهربائي الأمبير، ورمزها [A] مشتقة من اسم عائلته .

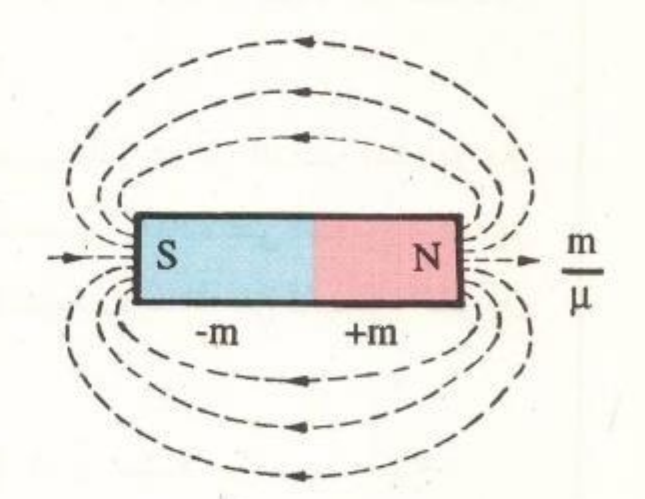
٢ - ١ - ٦ الفيض المغناطيسي والحاجب المغناطيسي

Magnetic flux and shield

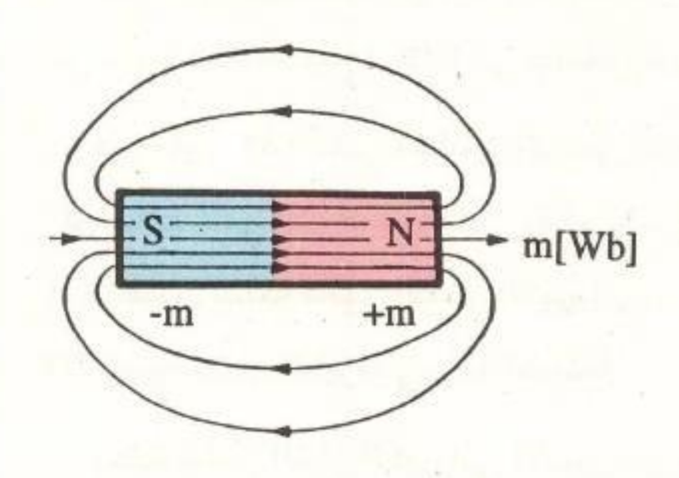
مع أن خط القوة المغناطيسي ملائم لشرح حالة المجال المغناطيسى إلا أنه لايلائم قطب مغناطيسى له قوة مغناطيسية ثابتة، وتتغير كمية خطوط القوة المغناطيسية تبعًا للوسط المحيط. القطب المغناطيسي الذي شدته 1 ويبر يشع $(1 / \mu_o)$ من خطوط القوى المغناطيسية في الفراغ، ويشع $(1 / \mu_o \mu_r)$ من خطوط القوى المغناطيسية في وسط له نفاذية نسبية (μ_r)

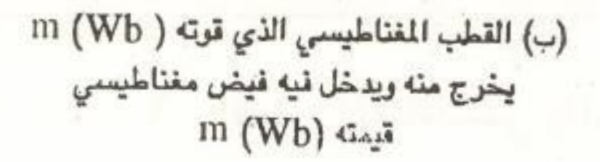
وبصرف النظر عن نوع الوسط، فإنه يمكن تخيل أن الأقطاب المغناطيسية التى لها القوة نفسها تشع عدد الخطوط المغناطيسية نفسه، وتسمى هذه الخطوط الفيض المغناطيسي. ووحدة الفيض المغناطيسى هي الويبر [Wb] وهى نفس وحدة قوة القطب المغناطيسى .

كما هو مبين في الشكل ٢ - ٩ (ب) نجد قضيبًا مغناطيسيا شدة كل من أقطابه المغناطيسية [m [Wb إذن فهناك فيض مغناطيسي قيمته [m [Wb يخرج من قطب (N) ويدخل في قطب (S) . أما في داخل المغناطيس فإن الفيض يسير من قطب (S) إلى قطب (N) بصرف النظر عن الوسط الخارجي .



(أ) عدد خطوط القوى المغناطيسية
يتغير طبقا لنوع الوسط

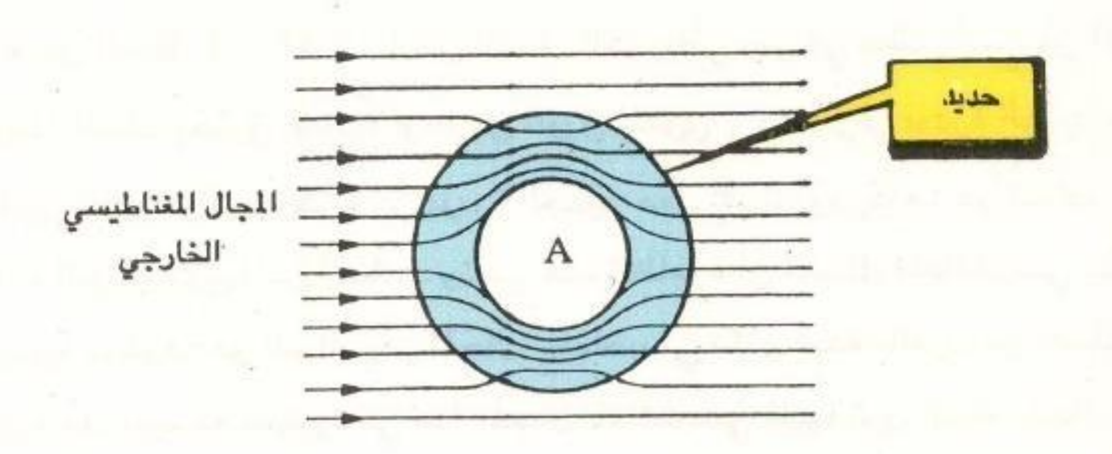



(ب) القطب المغناطيسي الذي قوته (m (Wb
يخرج منه ويدخل فيه فيض مغناطيسي
قيمته m (Wb)

الشكل ٢ – ٩ خطوط القوى المغناطيسية والفيض المغناطيسى

Lines of magnetic force and magnetic flux

الحاجب المغناطيسي يستخدم لوقاية مكان ما من تأثير المجال المغناطيسي الخارجى . والجدير بالذكر أنه لاتوجد مادة معينة للوقاية الكاملة من الفيض المغناطيسي . فكما هو مبين في الشكل ٢ – ١٠ نجد أن إحاطة المكان المراد وقايته بمادة مثل الحديد يمر خلالها الفيض المغناطيسي بسهولة (أي لها نفاذية نسبية عالية)* تجعل جزءًا كبيرًا من الفيض المغناطيسي الآتى من المجال المغناطيسي الخارجى يمر خلال الحديد دون أن يمر خلال جزء الفراغ الداخلى . وتستخدم هذه الطريقة بكثرة لوقاية الأدوات الكهربائية من المجال المغناطيسي الخارجي حتى لايتأثر عملها به .



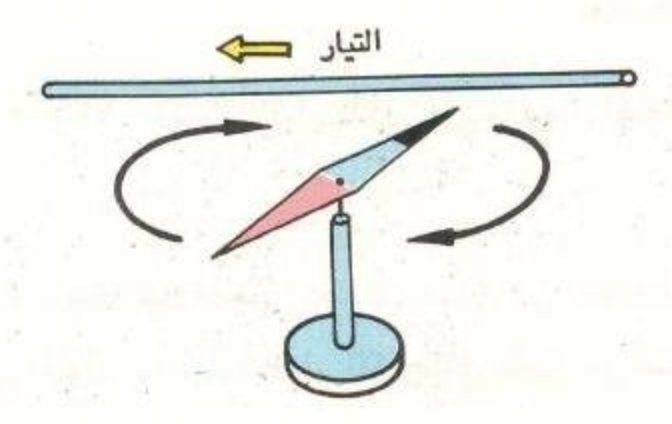
الشكل ٢ - ١٠ الحاجب المغناطيسى

* سوف نتناول النفاذية النسبية فيما بعد .

٢ - ٢ المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الكهربائي

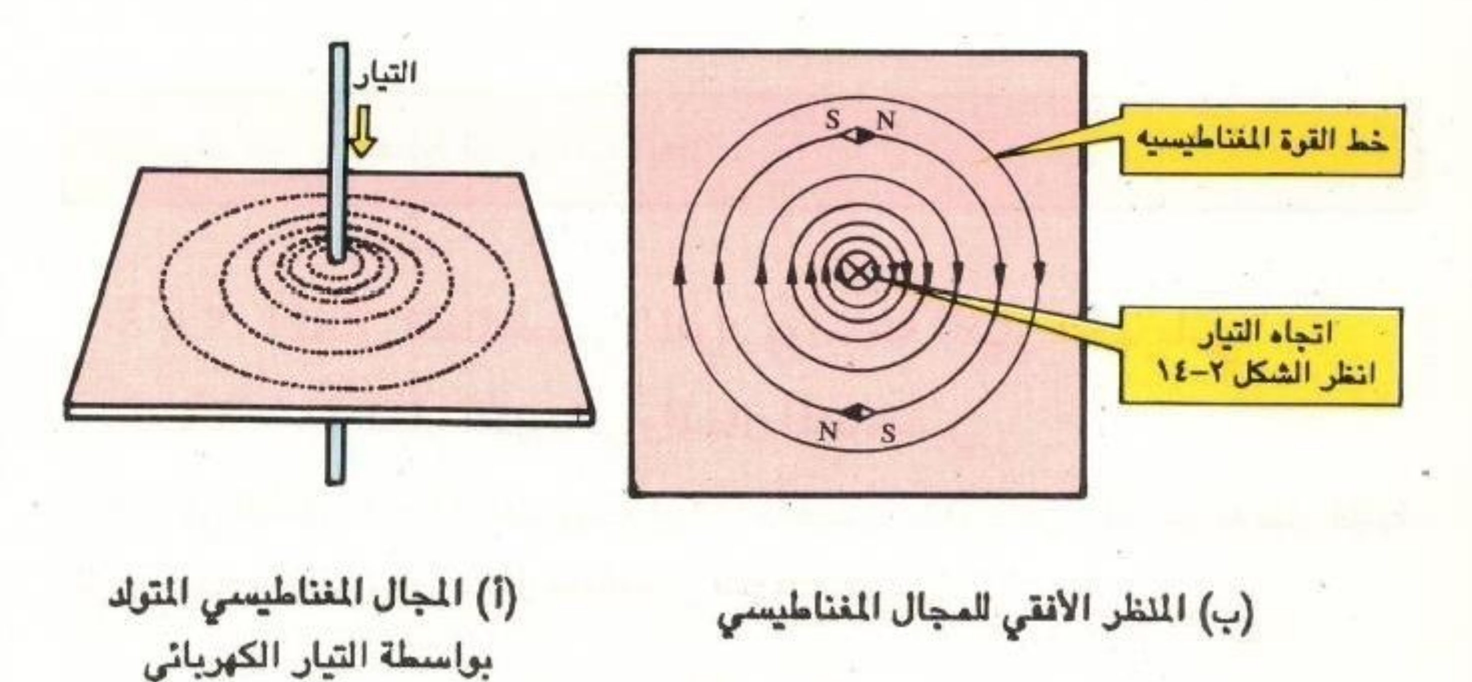
٢ - ٢ - ١ التيار الكهربائي والمجال المغناطيسي

كما في الشكل ٢ - ١١ عند وضع إبرة مغناطيسية بالقرب من سلك يمر به تيار فإنها تتأرجح مما يدل على وجود مجال مغناطيسى حول السلك .



الشكل ٢ - ١١ المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الكهربائي

ويلاحظ من الشكل ٢ – ١٢ (أ) أن التيار الكهربائي يمر في سلك رأسي من أعلى إلى أسفل ، وهذا السلك يخترق عموديًا لوحًا من الورق المقوى ، وعند رش بودرة الحديد على لوح الورق المقوى تظهر دوائر مركزية من بودرة الحديد حول السلك ومركزها هو السلك . وتزداد كثافة هذه الدوائر قريبًا من السلك . وتعنى هذه الظاهرة أن المجال المغناطيسي يتكون من دوائر مركزية مركزها هو السلك وأن المجال المغناطيسي أكثر شدة بالقرب من السلك . وإذا وضعنا إبرة مغناطيسية صغيرة في هذا المجال المغناطيسي فإنها تبين اتجاه المجال كما في الشكل ٢ – ١٢ (ب) .

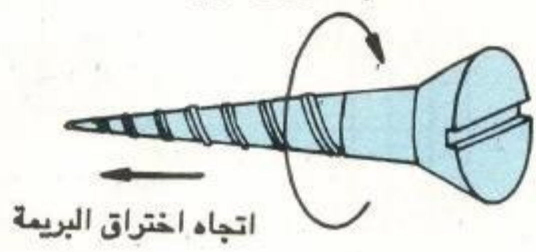


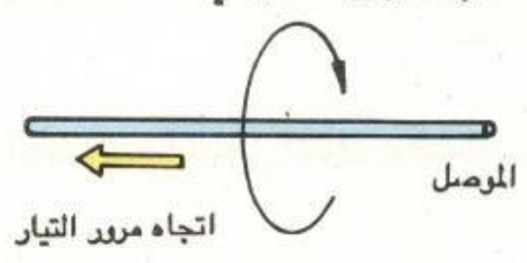
(أ) المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الكهربائي

(ب) المنظر الأفقي للمجال المغناطيسي

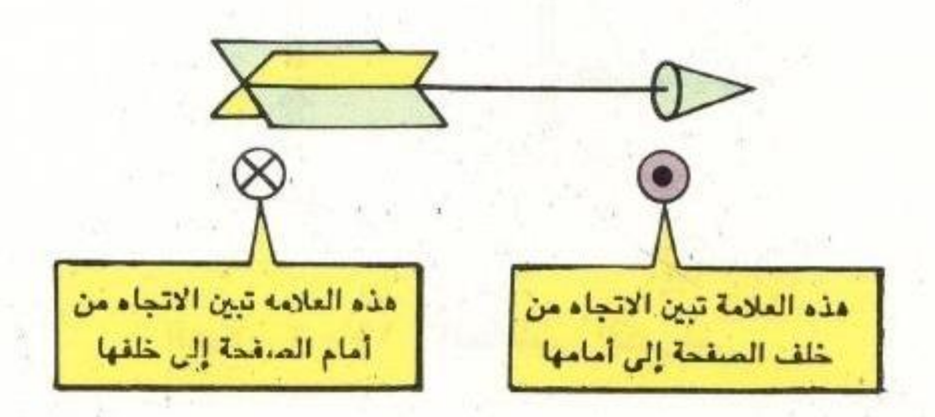
الشكل ٢ – ١٢ اتجاه التيار الكهربائي والمجال المغناطيسي

نتيجة لذلك عند إدارة بريمة اليد اليمنى بحيث تخترق في اتجاه التيار الكهربائي ؛ فإن اتجاه المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الكهربائي يكون هو نفسه اتجاه دوران البريمة وهذه هي قاعدة بريمة اليد اليمنى لأمبير . ويبين الشكل ٢ – ١٣ هذه العلاقات .

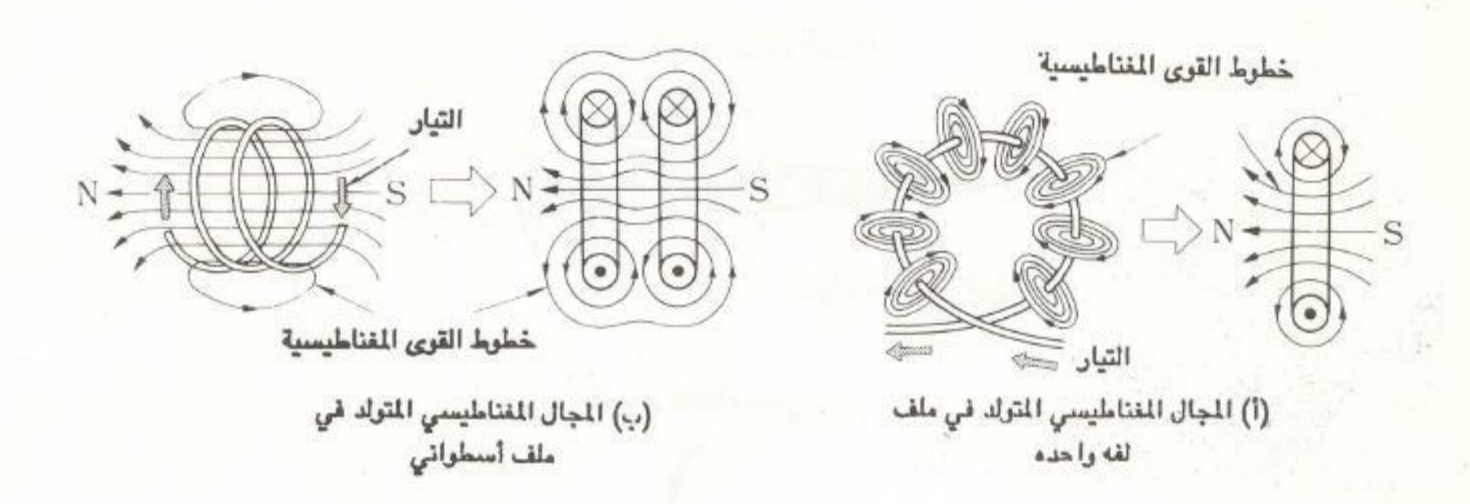




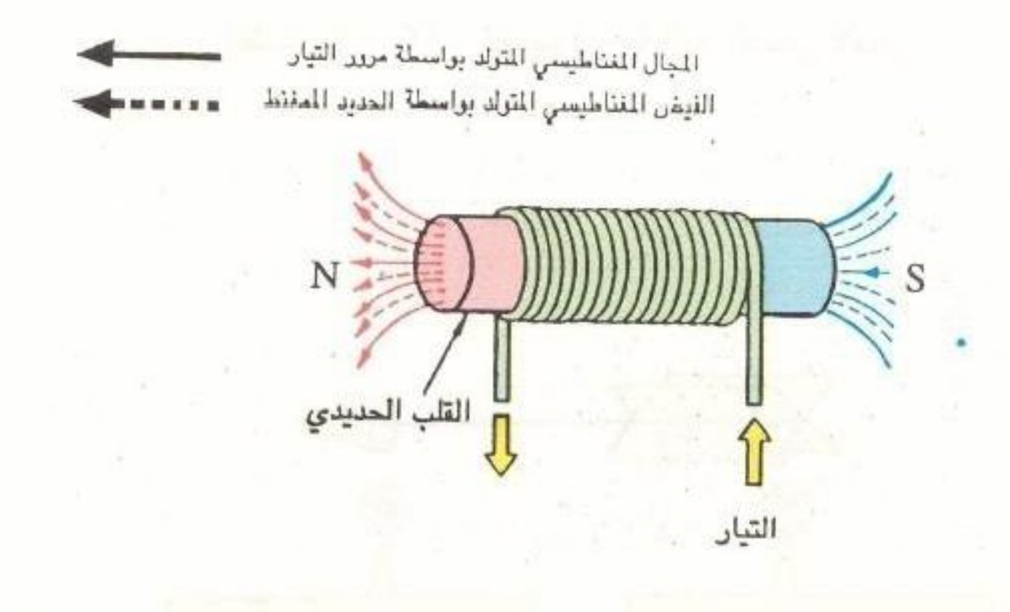
الشكل ٢ – ١٣ قاعدة بريمة اليد اليمنى لأمبير .



الشكل ٢ – ١٤ طريقة توضيح الاتجاه .



الشكل ٢ – ١٥   المجال المغناطيسي المتولد بواسطة مرور تيار في ملف .



الشكل ٢ – ١٦   المغناطيس الكهربائي .

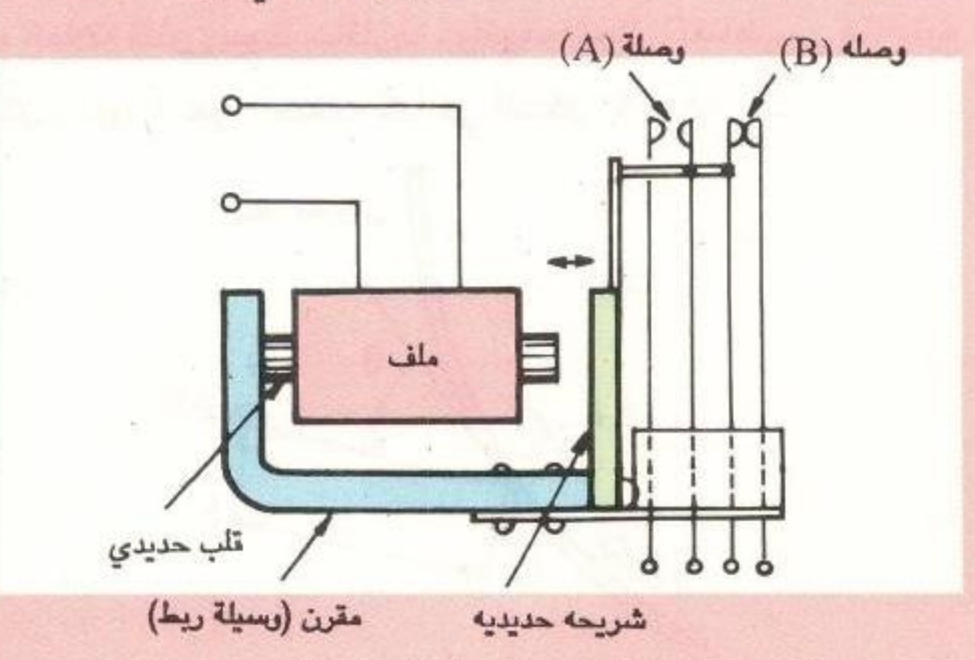
يمكن شرح المجال المغناطيسي المتولد بواسطة مرور تيار في ملف كما يلى : عند مرور التيار في ملف مكون من سلك ملفوف لفة واحدة؛ فإن المجال المغناطيسي يحدث كما في الشكل ٢ – ١٥ (أ) . ويوضح الشكل ٢ – ١٥ (ب) أنه عند مرور التيار في الملف

الاسطوانى يتولد المجال المغناطيسي باتجاه ثابت وشدة ثابتة داخل الملف، ويكون له قطبان مغناطيسيان (N) , (S) عند نهايتي الملف تمامًا كما في القضيب الممغنط . وهذا المغناطيس الناتج عن مرور التيار الكهربائي يسمى المغناطيس الكهربائي المبين بالشكل ٢ – ١٦ . في الاستخدام الفعلي في الأدوات الكهربائية يتم وضع قلب حديدي داخل الملف الأسطواني للحصول على مغناطيس أقوى (الملف الأسطواني هو سلك ملفوف حلزونيًا)..

المرحل الكهرومغناطيسى Electromagnetic relay

المرحل الكهرومغناطيسى هو أداة تستخدم المغناطيس الكهربائي بغرض فتح وقفل الدوائر الكهربائية . وهناك أحجام مختلفة للمرحل الكهرومغناطيسى للاستخدامات المختلفة التى تتراوح بين استخدامات القدرة واستخدامات التحكم .

يبين الشكل ٢ – ١٧ مبدأ عمل المرحل الكهرومغناطيسى . عند مرور التيار في الملف يجذب القلب الحديدى الشريحة الحديدية لتغلق أو تفتح الوصلة . وبصفة عامة يوجد وصلة (A) تغلق عند مرور التيار في الملف، ووصلة أخرى (B) تفتح عند مرور التيار . والملف الواحد يكون له عدة وصلات للفتح والغلق في الوقت نفسه .



الشكل ٢ – ١٧ مبدأ عمل المرحل الكهرومغناطيسى

٢ – ٢ – ٢ حساب المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الكهربائى

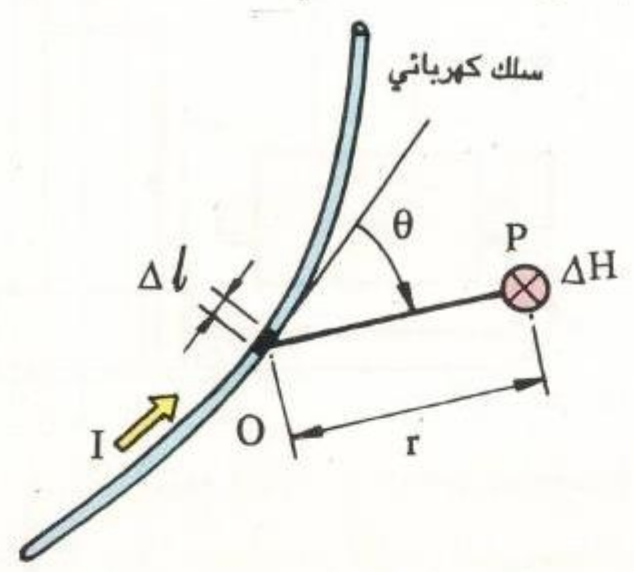
يمكن حساب شدة المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الكهربائي باستخدام قاعدة بيوت ساڤارت وقانون المسار المغلق لأمبير .

أ – قانون بيوت سافارت Biot - Savart's law

كما في الشكل ٢ – ١٨ عند مرور التيار في السلك يتولد مجال مغناطيسى حول التيار . إذا كانت الزاوية بين خط المماس ($\Delta \ell$) والخط (OP) هي (θ) ، فإن شدة المجال المغناطيسي ΔH [A/m] عند النقطة P التى تبعد مسافة r [m] من النقطة (O) الناشئ عند مرور التيار I [A] فى طول صغير من السلك $\Delta \ell$ [m] يمكن حسابه من المعادلة :

$$\Delta H = \frac{I \Delta \ell}{4 \pi r^2} \sin \theta \qquad [A/m] \qquad (2-4)$$

وتسمى هذه العلاقة قانون بيوت ساڤارت . واتجاه المجال المغناطيسي هنا يتبع قاعدة بريمة اليد اليمنى، ويكون عمودياً على الصفحة كما في الشكل ٢ – ١٨ .



الشكل ٢ – ١٨ قانون بيوت سافارت

فى المعادلة (4 - 2) ، ΔH هى شدة المجال المغناطيسي الناشئ عن الجزء الضئيل جداً ($\Delta \ell$) وشدة المجال المغناطيسي عند النقطة P هي مجموع التأثيرات الناشئة عن السلك بأكمله .

ب – المجال المغناطيسي لملف أسطواني Cylindrical coil

عندما يمر التيار [A] I في ملف أسطواني نصف قطره [m] r ، كما في الشكل ٢–١٩ يمكن حساب شدة المجال المغناطيسي [A/m] H عند مركز الملف P كما يلى:
نفترض أنه تم تقسيم الملف إلى (n) من الأقسام أطواله $(\Delta \ell_1)$, $(\Delta \ell_2)$, ..., $(\Delta \ell_n)$.
نفترض أيضا أن شدة المجال المغناطيسي عند المركز P الناشئ عن مرور التيار في هذه الأقسام هي (ΔH_1) , (ΔH_2),.. (ΔH_n) طبقا لقانون بيوت سافارت .

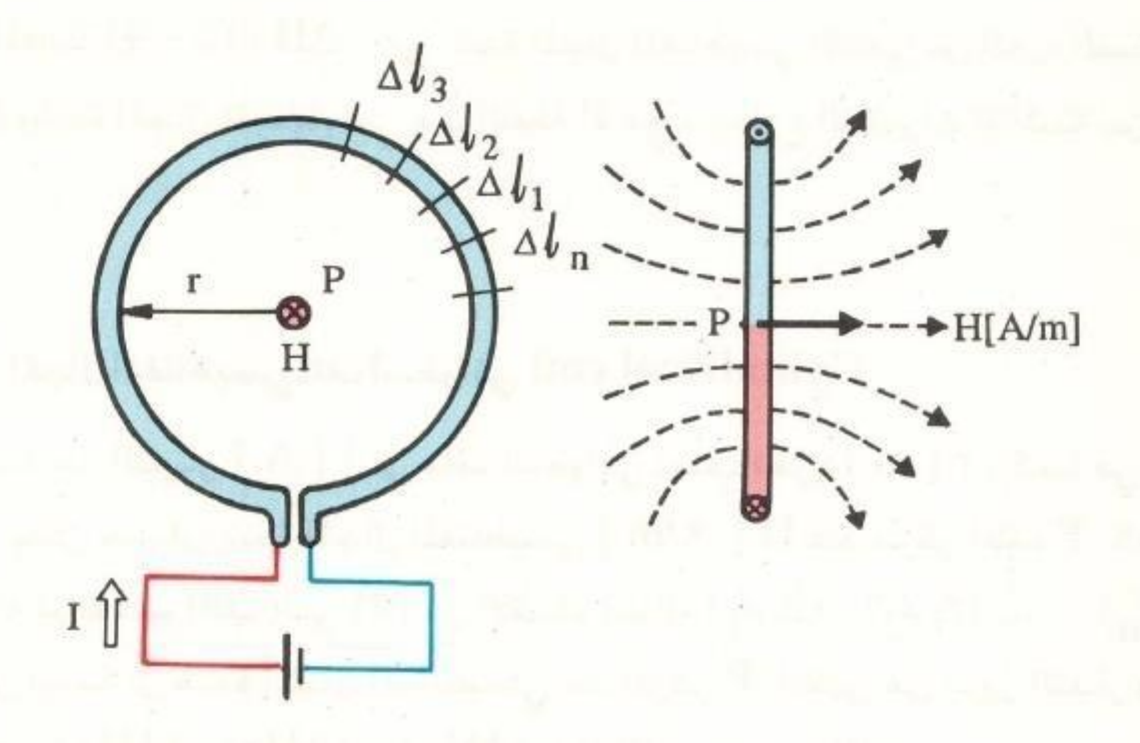
المسافة بين كل من هذه الأجزاء الصغيرة جداً وبين المركز P هي [m] r ، والزاوية θ تساوى 90 درجة لجميع هذه الأجزاء . أي إن $\sin \theta = \sin 90^o = 1$. من المعادلة (4 - 2) ينتج أن :

$$\Delta H_1 = \frac{I \Delta \ell_1}{4 \pi r^2} \quad , \Delta H_2 = \frac{I \Delta \ell_2}{4 \pi r^2} , ... \quad , \Delta H_n = \frac{I \Delta \ell_n}{4 \pi r^2}$$

طبقًا لقاعدة بريمة اليد اليمنى تكون اتجاهات المجال المغناطيسي عند النقطة P متطابقة .
وبتجميع هذه القيم نحصل على شدة المجال المغناطيسي الكلي [A/ m] H كما يلي :

$$H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + ... + \Delta H_n$$

$$= \frac{I}{4 \pi r^2} \left(\Delta \ell_1 + \Delta \ell_2 + ... + \Delta \ell_n \right)$$



الشكل ٢ – ١٩ المجال المغناطيسي لملف أسطواني

ومجموع الأطوال $(\Delta l_1), (\Delta l_2), \ldots\ldots, (\Delta l_n)$ هو طول محيط الملف وهو يساوى $2\pi r$ [m] . وبالتعويض في المعادلة نحصل على :

$$H = \frac{I}{4\pi r^2} \times 2\pi r = \frac{I}{2r} \quad [A/m] \qquad (2-5)$$

أما إذا كان عدد لفات الملف هو N، فإن شدة المجال المغناطيسي تكون :

$$H = \frac{NI}{2r} \quad [A/m] \qquad (2-6)$$

مثال٢

يمر تيار قيمته 0.4 أمبير في ملف أسطواني نصف قطره 10 سم ، ويتكون من 5 لفات . احسب شدة المجال المغناطيسي عند مركز الملف .

الحـــــل

نقوم بالتعويض في المعادلة (6 - 2) كالآتى :

$N = 5 , \; I = 0.4 \; A , \; r = 0.1 \; m$

$$H = \frac{5 \times 0.4}{2 \times 0.1} = 10 \quad A/m$$

سؤال ٣

عند مـرور تيـار في ملف أسطواني نصـف قطره 20 سم، ومكون من 10 لفات نشـأ مجال مغناطيسى كانت شدته عند مركز الملف 5 أمبير / متر .

احسب قيمة التيار المار في الملف .

حـ - قانون المسار المغلق لأمبير

كمـا في الشكل ٢ - ٢٠ نجد مسـار مغلق طوله ℓ (m) مكون من لفة واحدة تحـيط بسلك يمر به تيار $I \; [A]$ ينتج عنه مجال مغناطيسى . نفترض أن المسار المغلق تم تقسيمه إلــى عــدد (n) مــن الاقسام الصغيــرة طولهــا $\Delta\ell_1[m] , \Delta\ell_2 [m] , ..., \Delta\ell_n[m]$
وشــدة المجــال المغناطيسي عنــد هــذه الأقسام هي :

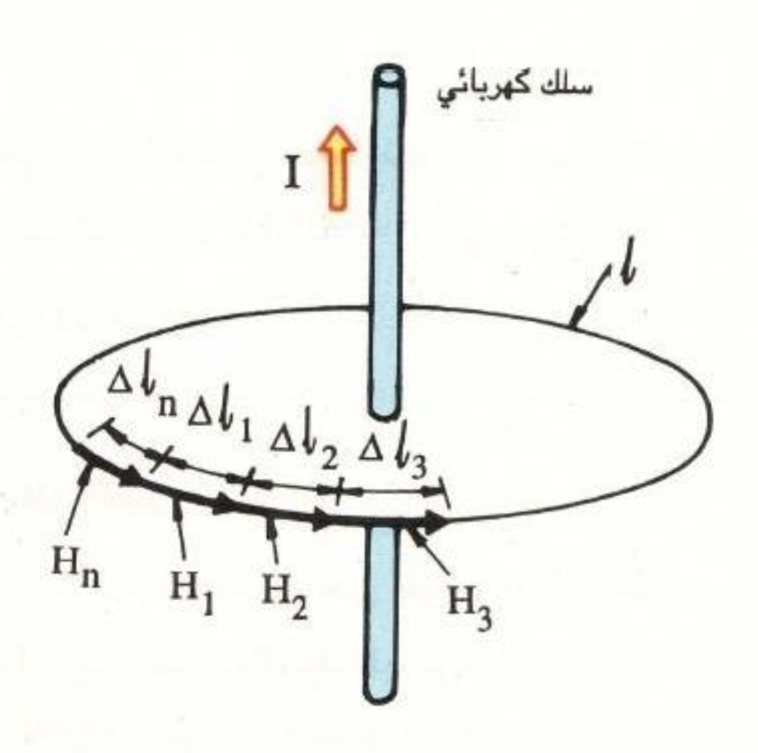
$H_1[A/m] , H_2[A/m] , ..., H_n[A/m]$.

إذن العلاقة بين المجال المغناطيسي والتيار الكهربائي تكون كالتالي :

$$H_1 \Delta \ell_1 + H_2 \Delta \ell_2 + ... + H_n \Delta \ell_n = \sum_{k=1}^{n} H_k \Delta \ell_k = I \qquad (2-7)$$

وتسمى هذه العلاقة بقانون المسار المغلق لأمبير.

العلاقة بين اتجاهات التيار والمجال المغناطيسي تتبع قاعدة اليد اليمنى . وعند تجميع الأجزاء المختلفة في المعادلة (2-7) يجب مراعاة اتجاه كل جزء . ويستخدم قانون بيوت ساقارت لحساب شدة المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الكهربائي . ومع ذلك فإنه بالنسبة لحالة المجال المغناطيسي يمكن إجراء حسابات بسيطة باستخدام قانون المسار المغلق لأمبير .



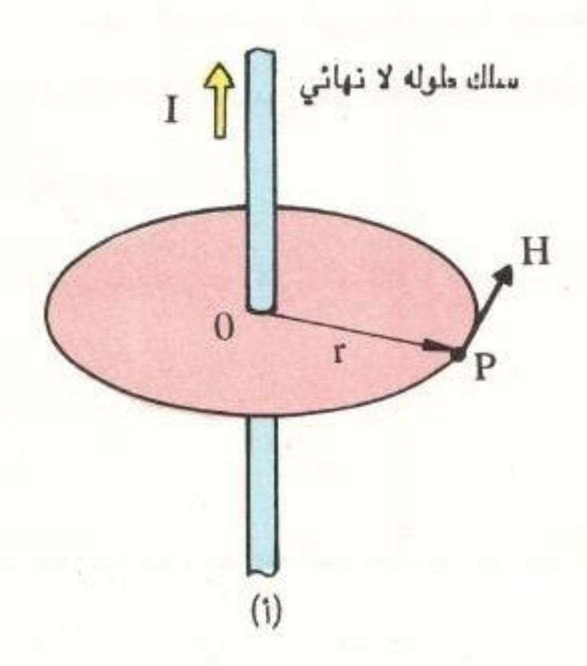
الشكل ٢ – ٢٠ قانون المسار المغلق لأمبير

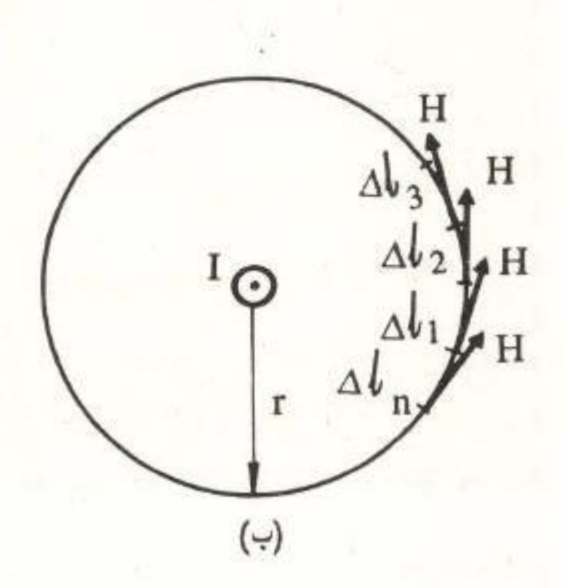
د – المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار الكهربائي في سلك خط مستقيم

كما في الشكل ٢ – ٢١ (أ) يمكن حساب شدة المجال المغناطيسي H [A/m] عند نقطة P تبعد مسافة r [m] من سلك خطى طوله لانهائى يمر فيه تيار I [A] كما يلى :

يكون المجال المغناطيسي في صورة حلقات مركزية مركزها المشترك هو السلك؛ لأن السلك طوله لانهائي . وتتساوى قيمة شدة المجال المغناطيسي عند أية نقطة على محيط الدائرة التي نصف قطرها r [m] .

أما اتجاه المجال المغناطيسي فيكون هو اتجاه خط المماس عند محيط الدائرة . ويمكن تطبيق قانون المسار المغلق لأمبير على المسار المغلق المكون من لفة واحدة وتبعد كل نقطة على المحيط مسافة r [m] من السلك المركزي .





الشكل ٢ – ٢١ المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار الكهربائي في سلك خط مستقيم

يوضح الشكل ٢ – ٢١ (ب) أنه عند تقسيم محيط الدائرة إلى عدد (n) من الأقسام الصغيرة أطوالها $\Delta l_1 , \Delta l_2 , \ldots , \Delta l_n$ وشدة المجال المغناطيسي عند كل منها هي H [A/ m] . نحصل على المعادلة التالية :

$$H\Delta\ell_1 + H\Delta\ell_2 + ... + H\Delta\ell_n = H(\Delta\ell_1 + \Delta\ell_2 + ... + \Delta\ell_n) = I[A]$$

وحيث إن $\Delta\ell_1 + \Delta\ell_2 + ... + \Delta\ell_n = 2\pi r$ إذن بالتعويض نجد أن :

$$H \times 2\pi r = I$$

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (A/m) \qquad (2-8)$$

مثال ٣

سلك كهربائي على شكل خط مستقيم يمر به تيار قيمته 5 أمبير ، احسب شدة المجال المغناطيسي عند نقطة تبعد 20 سم من السلك .

الحـــل

نقوم بالتعويض في المعادلة (8 - 2) كالآتـي :

$$I = 5\ A, \quad r = 0.2\ m$$

$$H = \frac{5}{2 \times 3.14 \times 0.2} = 3.98 \quad A/m$$

سؤال ٤

سلك كهربائي على شكل خط مستقيم يمر به تيار قيمته 1 أمبير ، احسب شدة المجال المغناطيسي عند نقطة تبعد 10 سم من السلك .

هـ - المجال المغناطيسي الناشئ عند مرور التيار في ملف أسطوانى

يبين الشكل ٢ - ٢٢ حساب شدة المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور التيار في ملف أسطواني .

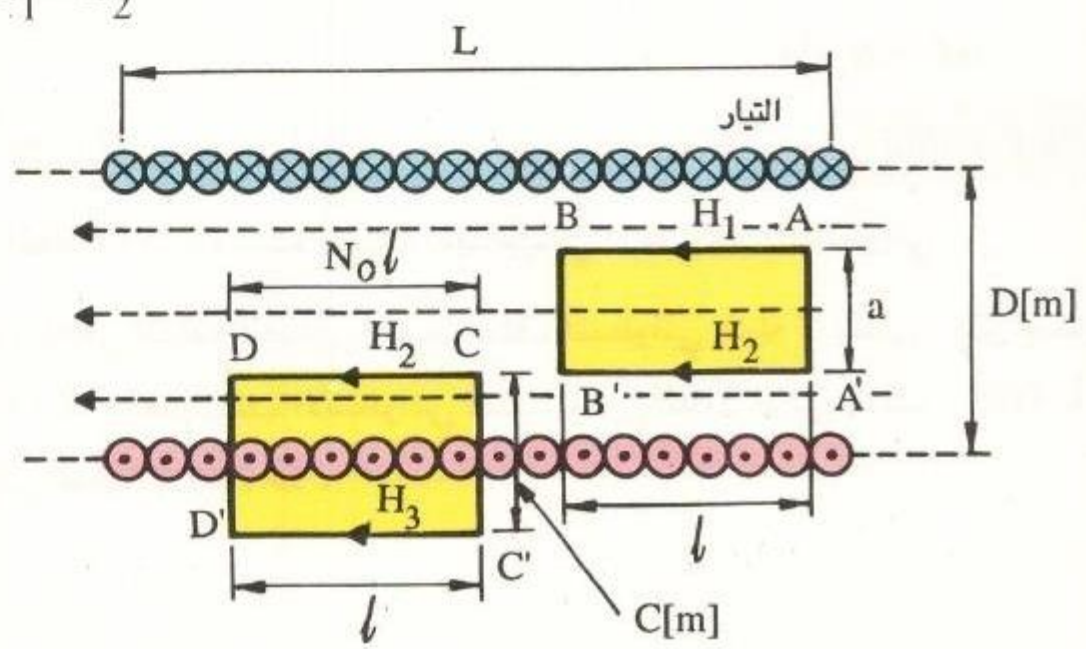
إذا افترضنا أن الملف الأسطوانى له طول لانهائي ؛ فإن المجال المغناطيسي داخل الملف يكون موازيًا لمحور الملف الأسطواني طبقًا لقاعدة اليد اليمنى ، وتكون شدة المجال المغناطيسي في الاتجاه العمودي على محور الملف مساوية للصفر .

وإذا أخذنا المسار المستطيل المغلق ABB'A' داخل الملف الأسطواني ، فيمكن تطبيق قانون المسار المغلق لأمبير . نفترض أن $AB = A'B' = l\ (m)$ وأن شدة المجال المغناطيسي في الجزء AB هى $H_1\ (A/m)$ وشدة المجال المغناطيسي في الجزء A'B' هى $H_2\ (A/m)$. ونفترض أن $AA' = BB' = a\ (m)$ فتكون شدة المجال المغناطيسي في هذين الجزأين مساوية للصفر . وحيث إنه لايمر تيار في هذا المسار المغلق فإن :

$$H_1 l + 0 \times a + (-H_2) l + 0 \times a = 0$$

أي أن

$$H_1 = H_2$$



الشكل ٢ - ٢٢ المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور التيار في ملف أسطواني

المعادلة السابقة تعني أن المجال المغناطيسي داخل الملف الأسطواني له الشدة نفسها في أى مكان . ويمثل ذلك مجالاً مغناطيسياً منتظماً له اتجاه ثابت وقيمة ثابتة .

بالطريقة نفسها إذا أخذنا مساراً مغلقاً خارج الملف الأسطواني . وحيث إنه لايمر تيار في ذلك المكان يكون المجال المغناطيسي خارج الملف الأسطواني منتظماً ، وعند نقطة تبعد بعداً لانهائياً من الملف الأسطوانى تكون شدة المجال المغناطيسي صفراً ؛ فإن شدة المجال المغناطيسي خارج الملف الأسطوانى تساوي صفراً في أي مكان .

بعد ذلك نأخذ المسار المغلق (CDD'C') الذي يحتوي على سطح الملف الأسطواني . وشدة المجال المغناطيسي الداخلى هي $H_1 = H_2 = H$ (A/m) في الجزء CD أما في باقي الأجزاء الداخلية في المجال المغناطيسي يساوي صفراً . نفترض أن $CD = C'D' = \ell$ (m) وأن $CC' = DD' = c$ (m) ونفترض أن التيار I (A) يمر في عدد ($N_o\ell$) من الموصلات في المسار المغلق .

وعلى ذلك يمكن استنتاج المعادلة الآتية :

$$H\ell + 0 \times C + 0 \times \ell + 0 \times C = N_o \ell I$$

إذن

$$H\ell = N_o \ell I$$

$$H = N_o I \quad (A/m) \qquad (2 - 9)$$

وتمثل المعادلة (9 - 2) شدة المجال المغناطيسي داخل الملف الأسطواني .

وحيث أنه في الواقع العملى لايوجد ملف أسطواني طوله لانهائي . إذن يمكن تطبيق المعادلة (9 - 2) داخل الملف الأسطوانى عندما يكون الطول الكلي للملف L (m) كبيراً بالنسبة إلى القطر D (m) .

مثال ٤

ملف اسطواني رفيع يحتوى كل 1 سم طولي منه على 5 لفات يمر به تيار قيمته 3 أمبير . احسب شدة القوة المغناطيسية داخل الملف الأسطواني .

الحــل

نقوم بالتعويض في المعادلة (9 - 2) كالآتى :

$$N_O = 500\ (\ /\ m\ )\ ,\ I = 3\ A$$

فنحصل على

$$H\ =\ 500 \times 3\ \ =\ 1500\ \ A/m$$

سؤال ٥

ملف أسطوانى عند مرور تيار قيمتـه 5 أمبير به تولد مجال مغناطيسى داخله شدته 2000 أمبير / متر ، أحسب عدد لفات الملف لكل سم طولي .

و- المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور التيار في ملف حلقة

كما في الشكل ٢ – ٢٣ الملف الحلقة هو سلك ملفوف بطريقة منتظمة في شكل حلقة ، ويمكن حساب شدة المجال المغناطيسي داخل هذا الملف عند مرور التيار فيه .

بتتبع اتجاه المجال المغناطيسي داخل الملف كما هو مبين بالشكل . نفترض أن عدد اللفات الكلى هو (N) والتيار المار به هو (I (A ومتوسط نصف قطر الحلقة هو (r (m . نستخدم قانون المسار المغلق لأمبير في حساب شدة المجال المغناطيسي (H (A/m كما يلي :

$$H \times 2\pi r = NI$$

وإذا فرضنا أن $2\pi r = \ell$ نحصل على المعادلة الآتية :

$$H = \frac{NI}{2\pi r} = \frac{NI}{\ell} \quad (A/m) \qquad (2-10)$$

من المعادلة (10 - 2) يظهر أن هناك فرقًا بين شدة المجال المغناطيسي داخل الحلقة عند النقط التي تبعد مسافة r_1 (m) عن مركز الحلقة O والنقط التي تبعد مسافة r_2 (m) عن مركز الحلقة . ومع ذلك فإنه إذا كان الفرق بين نصف القطر الخارجى ونصف القطر الداخلى صغيراً جداً بالنسبة لأي منهما ؛ فإن شدة المجال المغناطيسي الداخلى تكون تقريبا متساوية عند النقط المختلفة . ولهذا فإنه بوجه عام تعدّ قيمة المجال المغناطيسي عند محيط المقطع الدائري للملف مساوية لشدة المجال المغناطيسي الداخلى على أساس أنه مجال مغناطيسى منتظم .

مثال ٥

ملف على هيئة حلقة متوسط نصف قطره 10 سم وعدد اللفات الكلى به 100 ، مر به تيار فأحدث مجالاً مغناطيسياً داخلياً شدته 800 أمبير/ متر . احسب قيمة التيار .

الحل

نقوم بالتعويض في المعادلة (10 - 2) بالقيم الآتية :

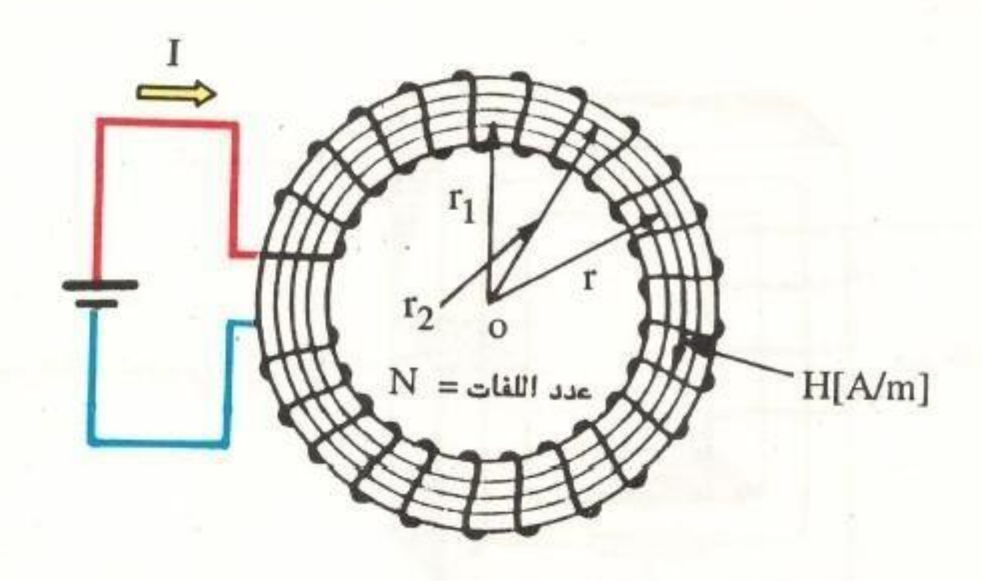
$$r = 0.1 \text{ m}, \quad N = 100, \quad H = 800 \text{ A/m}$$

نحصل على

$$I = \frac{800 \times 2 \times 3.14 \times 0.1}{100} = 5 \text{ A}$$

سـؤال ٦

في الشكل ٢ – ٢٣ إذا كان العـدد الكلى للفـات = 500 ، ومتوسـط نصف قطر الحلقة* يساوى 20 سم ، وقيمة التيار تساوي 4 أمبير . احسب شدة المجال المغناطيسي الداخلي للملف .



الشكل ٢ – ٢٣ المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور التيار في ملف حلقـة

* لاحظ أن متوسط نصف قطر الحلقة هو المسافة بين مركز الحلقـة O ومركز المقطع الدائرى للملف الحلقة .

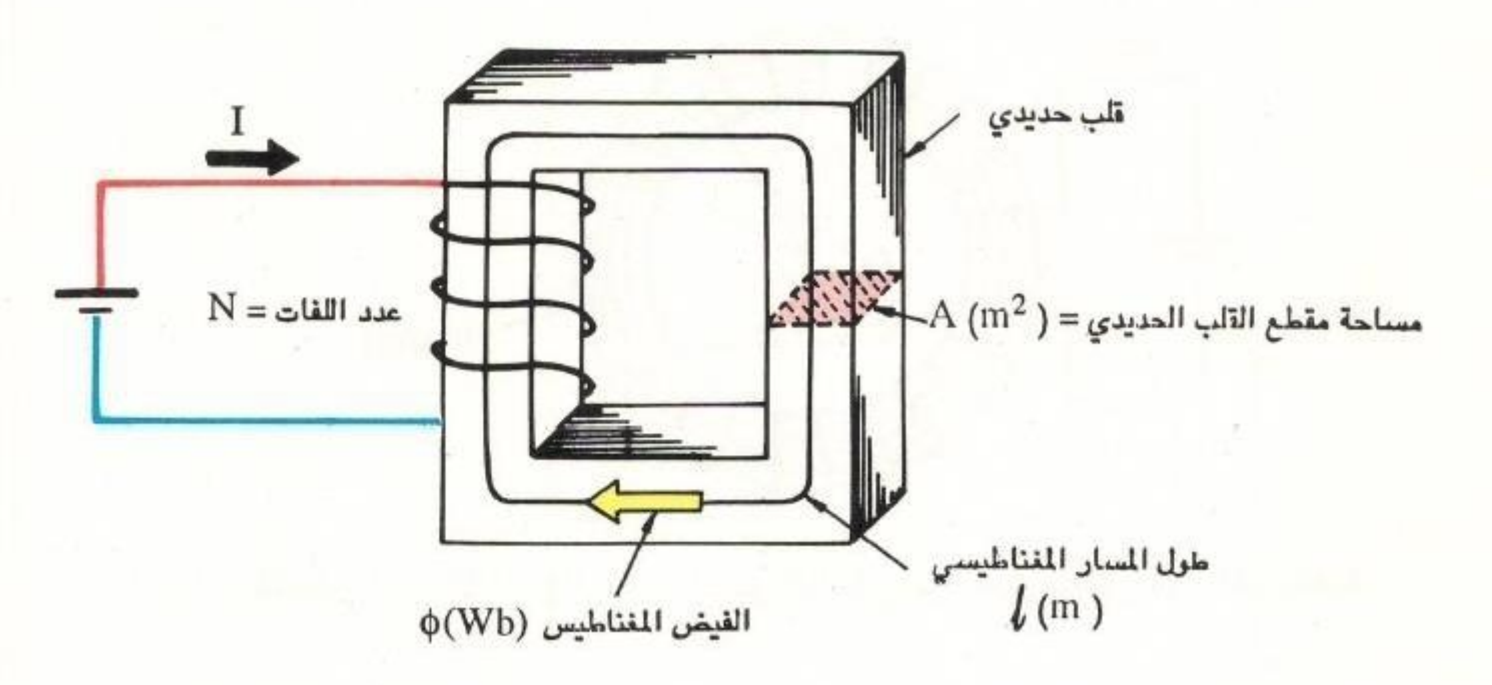
٢ – ٣ الدائرة المغناطيسية Magenetic Circuit

٢ – ٣ – ١ الدائرة المغناطيسية والمقاومة المغناطيسية

أ- الدائرة المغناطيسية والقوة الدافعة المغناطيسية Magnetomotive force

كما في الشكل ٢ – ٢٤ عند مرور التيار الكهربائي [I [A فى الملف الملفوف حول

قلب حديدى يتولد فيض مغناطيس $[Wb]\ \phi$ في القلب الحديدى . ويزيد الفيض المغناطيسي ϕ بزيادة عدد لفات الملف (N) وبزيادة التيار I . أي إن الفيض المغناطيسي ϕ يتناسب مع حاصل الضرب (NI) عدد اللفات N في قيمة التيار I . وحاصل الضرب NI كمصدر للفيض المغناطيسي يعمل كقوة دافعة مغناطيسية وحدة قياسها الأمبير، ويرمز لها بالرمز [A]. ومسار الفيض المغناطيسي هو الدائرة المغناطيسية .



الشكل ٢ – ٢٤ الدائرة المغناطيسية

سؤال٧

احسب القوة الدافعة المغناطيسية الناشئة من مرور تيار 0.2 أمبير في ملف به 500 لفة . ثم احسب التيار المطلوب لتوليد القوة الدافعة المغناطيسية نفسها في ملف به 50 لفة .

ب-المقاومة المغناطيسية والنفاذية Magnetic reluctance and permeability

كما في الشكل ٢ – ٢٤ تقوم القوة الدافعة المغناطيسية [A] NI المؤثرة على دائرة مغناطيسية بتوليد فيض مغناطيسى [Wb] ϕ والنسبة بين القوة الدافعة المغناطيسية والفيض المغناطيسي تسمى الممانعة أو المقاومة المغناطيسية للدائرة المغناطيسية، وتعبر عن صعوبة مرور الفيض المغناطيسي ضد القوة الدافعة المغناطيسية . وهذه العلاقة تناظر النسبة بين القوة الدافعة الكهربائية والتيار في الدائرة الكهربائية أى المقاومة الكهربائية .

وتعبر المعادلة الآتية عن المقاومة المغناطيسية (R_m) ووحدة قياسها هي مقلوب الهنري ويرمز لها بالرمز $[H^{-1}]$.

$$R_m = \frac{NI}{\phi} \quad [H^{-1}] \qquad (2\text{-}11)$$

فى الدائرة المغناطيسية يسهل مرور الفيض المغناطيسي [Wb] ϕ فى قلب حديدى ذى مساحة مقطع كبيرة $A\ [m^2]$ ، ويصعب مروره في مسار مغناطيسى طوله [m] ℓ كبير ، ولهذا يمكن التعبير عن المقاومة المغناطيسية كما يلى :

$$R_m = \frac{1}{\mu} \frac{\ell}{A} \quad [H^{-1}] \qquad (2 - 12)$$

تعتمد قيمة النفاذية (μ) على المادة المكونة للمسار المغناطيسي . ووحدة قياس النفاذية هي هنرى/ متر، ويرمز لها بالرمز [H / m] كما يتضح من المعادلة (12 - 2).

والنفاذية النسبية هي النسبة (μ/μ_o) بين نفاذية المادة (μ) ونفاذية الفراغ (μ_o). والعلاقة الآتية تعبر عن النفاذية النسبية (μ_r) .

$$\mu = \mu_o \mu_r \quad [H/m] \qquad (2 - 13)$$

النفاذية النسبية μ_r هي قيمة مهمة تعبر عن الخواص المغناطيسية للمادة، وتوجد عدة أمثلة لها في الجدول ٢ - ١

المادة	النفاذية النسبية μ_r	المادة	النفاذية النسبية μ_r
الفضة	0.9999736	الاكسجين	1.000179
النحاس	0.9999906	الألومنيوم	1.000214
الماء	0.9999912	لوح من الصلب السيليكوني	10^3
الهواء	1.000000365	سبيكة عالية النفاذية المغناطيسية	10^4

الجدول ٢ - ١ النفاذية النسبية μ_r.

فى الجدول ٢ - ١ المادة الحديدية المغناطيسية هي مادة لها نفاذية نسبية كبيرة جـــدا ($\mu_r >> 1$) مثل صلب السيليكون الذى يستخدم عادة للدوائر المغناطيسية، والمادة التي تكون نفاذيتها النسبية أكبر من الواحد($\mu_r > 1$) تسمى مـادة بارا مغناطيسيـة . أما المادة التي تكون نفاذيتها النسبية أقل من الواحد($\mu_r < 1$) فتسمى مادة ديامغناطيسية .

الدائرة الكهربائية		الدائرة المغناطيسية	
$E\ [V]$	القوة الدافعة الكهربائية	$NI\ [A]$	القوة المغناطيسية
$I\ [A]$	التيار	$\phi\ [Wb]$	الفيض المغناطيسي
$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\ell}{A} [\Omega]$	المقاومة الكهربائية	$R_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\ell}{A} [H^{-1}]$	الممانعة المغناطيسية
$\sigma\ [S/m]$	الموصلية	$\mu\ [H/m]$	النفاذية

الجدول ٢ – ٢ التناظر بين الدوائر المغناطيسية والكهربائية

يبين الجدول ٢ – ٢ علاقات التناظر بين دائرة مغناطيسية ودائرة كهربائية . وعن طريق هذه العلاقات يمكن تطبيق قانون أوم وقانون كيرشوف المستخدمين في الدائرة الكهربائية ، على الدائرة المغناطيسية .

مثال٦

فى الدائرة المغناطيسية في الشكل ٢ – ٢٥ تؤثر قوة دافعة مغناطيسية (NI) قيمتها 200 أمبير على قلب حديدى مساحة مقطعه (A) تساوى 3 سم٢ ، وطول المسار المغناطيسي (ℓ) له هو 50 سم، و النفاذية النسبية (μ_r) هى 1000 . احسب الفيض المغناطيسي $\phi\ [Wb]$. واحسب الفيض المغناطيسي في قلب حديدي به فجوة طولها (ℓ_2) يساوى 1 مم .

الحل

نفترض أن $R_{mi}\ [H^{-1}]$ هي المقاومة المغناطيسية للقلب الحديدي، وأن $R_{mg}\ [H^{-1}]$ هي المقاومة المغناطيسية للفجوة

يمكن حساب المقاومة المغناطيسية بدون الفجوة كالآتي :

$$R_{mi} = \frac{1}{\mu_o \mu_r} \times \frac{l}{A} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7} \times 1000} \times \frac{50 \times 10^{-2}}{3 \times 10^{-4}} = 1.33 \times 10^{6} \quad H^{-1}$$

$$\phi = \frac{NI}{R_{mi}} = \frac{200}{1.33 \times 10^{6}} = 150.4 \times 10^{-6} \quad Wb$$

ويمكن حساب المقاومة المغناطيسية مع وجود الفجوة كالآتى :

$$R_{mi} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7} \times 1000} \times \frac{49.9 \times 10^{-2}}{3 \times 10^{-4}} = 1.32 \times 10^{6} \quad H^{-1}$$

$$R_{mg} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} \times \frac{0.1 \times 10^{-2}}{3 \times 10^{-4}} = 2.65 \times 10^{6} \quad H^{-1}$$

$$\phi = \frac{NI}{R_{mi} + R_{mg}} = \frac{200}{(1.32 + 2.65) \times 10^{6}} = 50.4 \times 10^{-6} \quad Wb$$

يتضح من مثال ٦ أن وجود فجوة في القلب الحديدي يؤدى إلى إنقاص الفيض المغناطيسي بصورة كبيرة ؛ ولهذا فإنه للحصول على فيض مغناطيسي كبير يجب تحاشى وجود فجوة في القلب الحديدي .

سؤال٨

دائرة مغناطيسية ذات فيض مغناطيسى متولد [Wb] مقداره $0.1x\ 10^{-3}$ من القوة الدافعة المغناطيسية 150 A. إحسب قيمة المقاومة المغناطيسية لهذه الدائره.

سؤال٩

قلب حديدي مساحة مقطعه (A) تساوى 5 سم٢ وطول المسار المغناطيسي (ℓ) يساوي 1 متر والمقاومة المغناطيسية (R_m) تساوى 1×10^6 هنرى $^{-1}$.

احسب النفاذية (μ).

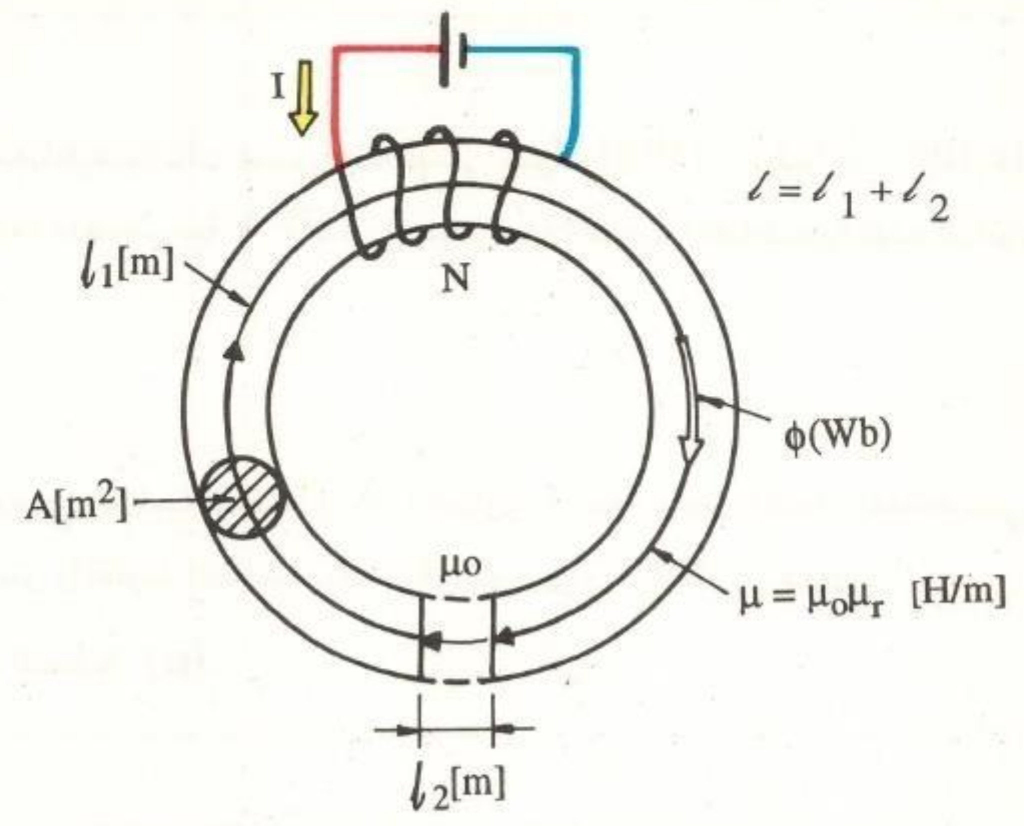
٢ – ٣ – ٢ كثافة الفيض المغناطيسي وشدة المجال المغناطيسي

Magnetic Flux Density and Magnetic Field Intensity

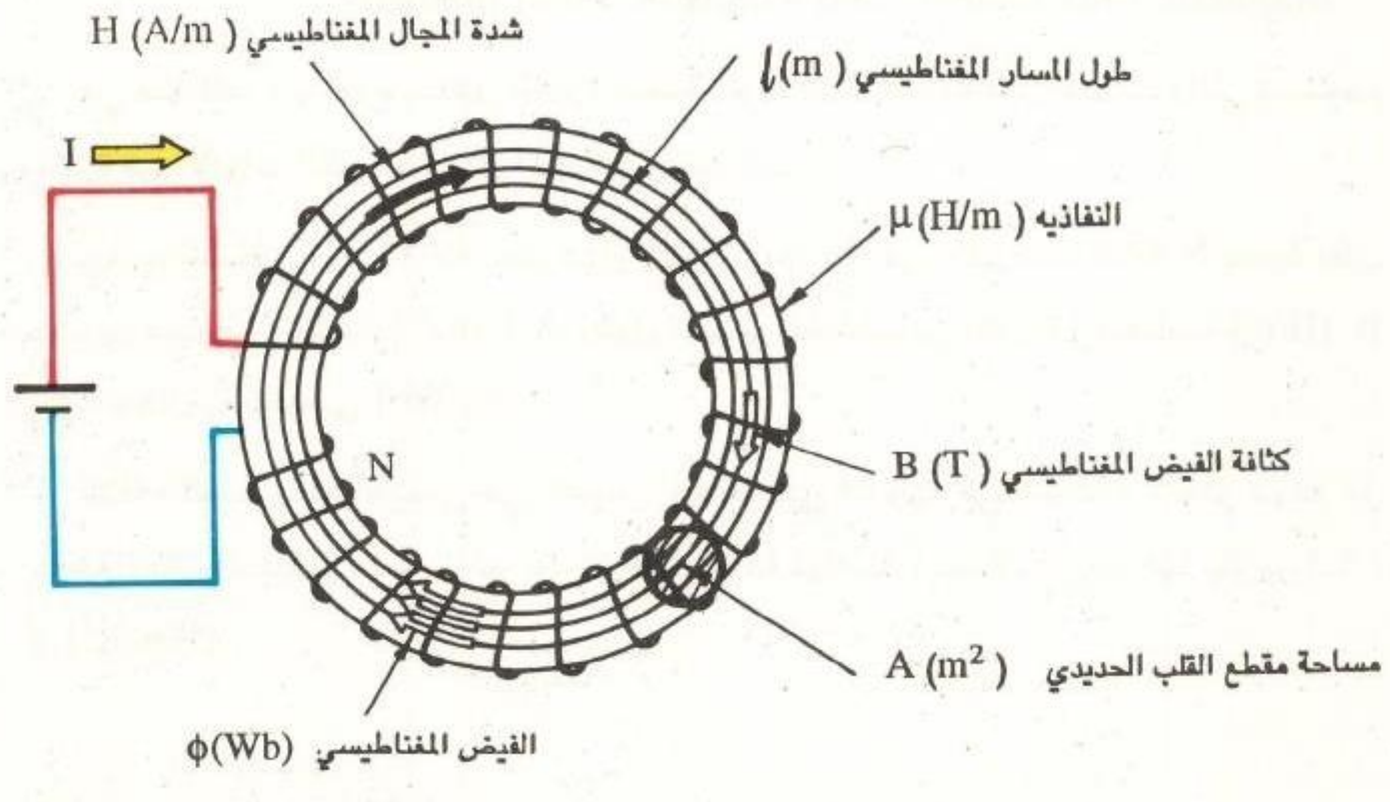
في هذا الجزء سنقوم بتحليل ظاهرة تمغنط المواد المغناطيسية مثل الحديد، والتي تستخدم بكثرة في الأدوات الكهربائية مثل المحولات والمحركات .

يوضح الشكل ٢ – ٢٦ أنه عند مرور التيار I [A] فى ملف عدد لفاته N يحيط بقلب حديدى مساحة مقطعه [m2] A وطول المسار المغناطيسي [m] ℓ والنفاذية [H/m] μ ينشأ مجال مغناطيسى {Wb } ϕ :

كثافة الفيض المغناطيسي هي الفيض المغناطيسي الموجود في مساحة 1 متر مربع من مقطع القلب الحديدى ، ويرمز لها بالرمز B ووحدة قياسها (تسلا) ويرمز لها بالرمز [T] أو $[Wb/m^2]$.



الشكل ٢ – ٢٥ دائرة مغناطيسية بها فجوة في القلب الحديدي



الشكل ٢ – ٢٦ كثافة الفيض المغناطيسي وشدة المجال المغناطيسي

فــى الشكل ٢ – ٢٦ يمكـــن استنتـــاج المقاومة المغناطيسية R_m من المعادلة (2-11) والمعادلة (2-12) كما يلى :

$$R_m = \frac{NI}{\phi} = \frac{l}{\mu A}$$

من هذه المعادلة نحصل على :

$$\frac{NI}{l} = \frac{\phi}{\mu A} \qquad (2-14)$$

الطـرف الأيسر من العلاقة (2-14) يعبر عن القوة الدافعة المغناطيسية لكل 1 متر من الملف ويناظر شدة المجال المغناطيسي [A/ m] H داخل المسـار المغناطيسي كمـا هو مـعلوم من المعادلة (9 - 2) . في الطرف الأيمن الكمـيـة (ϕ / A) هي كثافة الفيض المغناطيسي [T] B ويمكن التعبير عن المعادلة (2-14) بالعلاقة الآتية :

$$H = \frac{NI}{l} = \frac{B}{\mu} \qquad [A/m] \qquad (2-15)$$

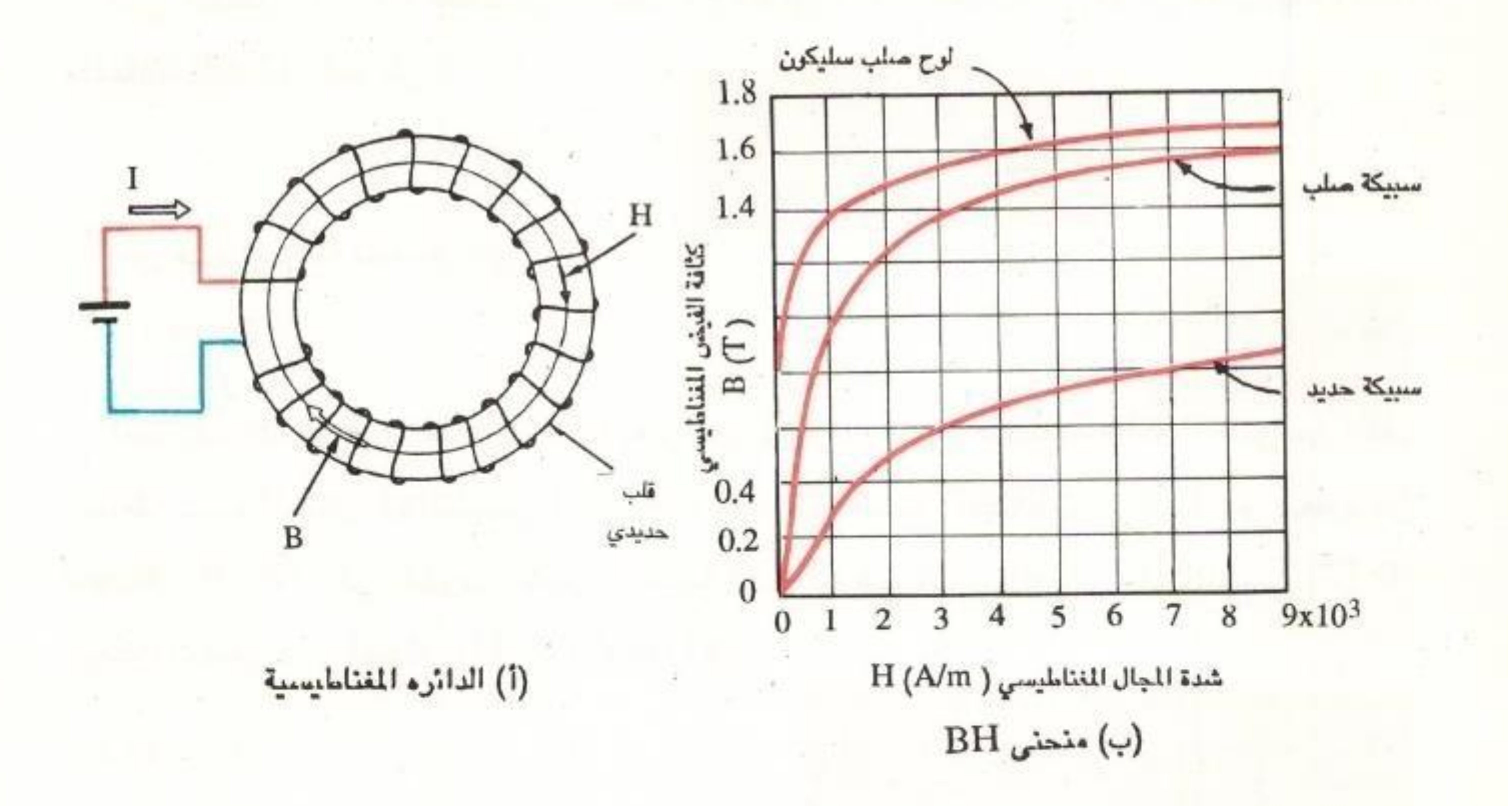
$$B = \mu H \qquad [T] \qquad (2-16)$$

٢ – ٣ – ٣ منحنى المغنطة والنفاذية

Magnetization curve and permeability

توجد علاقة بين كثافة الفيض المغناطيسي (B) وشدة المجال المغـناطيســـي (H) ، هـى ($B=\mu H$)فى الفرا غ وفى الهواء تكون قيمة النفاذية (μ) ثابتة، ولهذا فإن العلاقة بين H , B تكون علاقة خط مستقيم . أما في المواد المغناطيسية فإن النفاذية (μ) تتغير وتكون العلاقة بين H , B غير خطية .

عند الزيادة التدريجية للتيـار المار في ملف ملفوف حول قلب حـديدى لم تسبق مـغنطتـه إطلاقًا كما في الشبكل ٢ – ٢٧ (أ) ، يزيد الفيض المغناطيسي في القلب الحديدي بالتدريج . والعلاقة بين شدة المجال المغناطيسي [A / m] H وكثافة الفيض المغناطيسي [T] B تبينها منحنيات الشكل ٢ – ٢٧ (ب) .هذه المنحنيات تسمى منحنى BH أو منحنى المغنطة.



الشكل ٢ – ٢٧ منحنى BH للحديد

وبوجه عام فإن منحنى BH منحنى غير خطي، وله خاصية التشبع عند زيادة شدة المجال المغناطيسي H . وهذه الخاصية تسمى بالتشبع المغناطيسي .

النفاذية (H / B =) μ هي قيمة غير ثابتة ، وتتغير مع تغير شدة المجال المغناطيسي ، ولهذا فإن العلاقة بين H , B تصبح علاقة غير خطية .

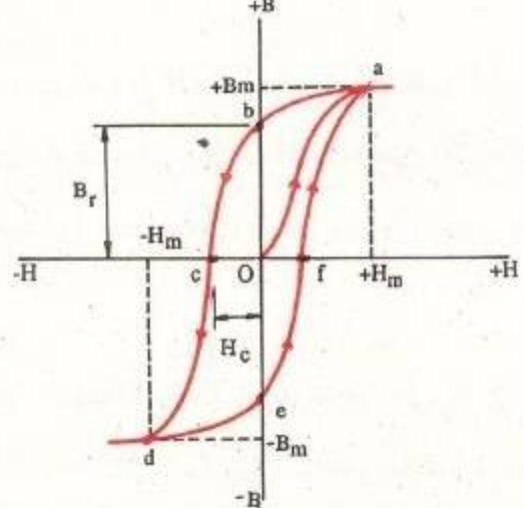
يبين الشكل ٢ – ٢٧ (ب) منحنيات BH لعدد من المواد التى تستخدم عادة كقلب حديدي في الأدوات الكهربائية . ومن هذه المواد صلب السيليكون وسبيكة الحديد.

شدة المجال المغناطيسي (H) هي كثافة خطوط القوى المغناطيسية؛ والنفاذية (μ) هى النسبة بين كثافة الفيض المغناطيسي وكثافة خطوط القوى المغناطيسية طبقًا للعلاقة

((2-16)) . ولهذا فإن عددا قدره (B) من الفيض المغناطيسي يناظر عددا قدره (B / μ) من خطوط القوى المغناطيسية ، وهذا ينطبق مع نتيجة الشكل ٢ – ٩ .

٢ – ٣ – ٤ حلقة التخلف المغناطيسي (الهيسترسيس) Hysteresis loop

في الجزء التالى سوف نلقى مزيد من الضوء على ظاهرة مغنطة المواد المغناطيسية مثل الحديد. في الشكل ٢ – ٢٨ نجد أنه عند زيادة شدة المجال المغناطيسي (H) من النقطة O إلى $(+H_m)$ تتغير كثافة الفيض المغناطيسي (B) من النقطة O إلى النقطة (a) ، عند إنقاص شدة المجال المغناطيسي (H) من $(+ H_m)$ إلى الصفر تتغير كثافة الفيض المغناطيسي (B) من النقطة a إلى النقطة b حيث كثافة الفيض المغناطيسي تساوى B_r وهى قيمة لاتساوى صفراً برغم أن شدة المجال المغناطيسي تساوى صفراً . وهذه هي الفيض المغناطيسي المتبقي . والآن عند تغيير شدة المجال المغناطيسي من الصفر إلى القيمة السالبة (H_c) تقل كثافة الفيض المغناطيسي من B_r إلى الصفر . وشدة المجال المغناطيسي H_c التى تكون عندها كثافة الفيض المغناطيسي صفرا تسمى القوة الجبرية . وبتغيير H من القيمة H_c إلى H_m تتغير كثافة الفيض المغناطيسي من صفر إلى $(-B_m)$. والآن عند زيادة شدة المجال المغناطيسي من $(- H_m)$ إلى $(+ H_m)$ يمر المنحنى بالنقط (d) ثم (e) ثم (f) ثم (a) لنحصل على حلقة مغلقة .



الشكل ٢ – ٢٨ خواص التخلف المغناطيسي

هذه الظاهرة تسمى خاصية التخلف المغناطيسي، والمنحنى المغلق الذي يبين هذه الخاصية المميزة يسمى حلقة الهيسترسيس .

ويستهلك الدوران في حلقة التخلف المغناطيسي طاقة تتناسب مع المساحة المحاطة بهذه الحلقة . وهذه الطاقة تسمى فقد التخلف المغناطيسي . عند مغنطة القلب الحديدى باستخدام التيار المتغير يحدث فقد في القدرة (يسمى فقد التخلف المغناطيسي) بطريقة دورية مما يتسبب في رفع درجة حرارة القلب الحديدى . لهذا فإن القلب الحديدى للأدوات الإلكترونية التي تعمل بالتيار المتغير تستخدم صفائح الحديد المطاوع وصفائح الصلب السيليكون* التي لها حلقة تخلف مغناطيسي ذات مساحة صغيرة، وذلك لتقليل فقد التخلف المغناطيسي . أما في المغناطيسات الثابتة حيث يطبق كثافة الفيض المغناطيسي المتبقى والقوة الجبرية لشدة المجال المغناطيسي فإنها تستخدم صلب (MK) ** وصلب (KS) *** التي لها حلقة تخلف مغناطيسي ذات مساحة كبيرة .

* تصنع صفائح صلب السيليكون عن طريق الدرفلة الساخنة للحديد النقي المحتوي على كمية قليلة من الكربون مع إضافة السيليكون بنسبة 1-4.5% . وتزيد كل من المقاومة النوعية والنفاذية النسبية لتقليل فقد التخلف المغناطيسي . وفى الأدوات الإلكترونية يتكون القلب الحديدى من صفائح الصلب السيليكون جنبًا إلى جنب مع وجود عازل .

** صلب (MK) هو سبيكة من الصلب تحتوى على 15-40% نيكل و 9-15% ألومنيوم وقليل من الكوبالت . وهذه هي مادة المغناطيس الثابت ولها خواص مغناطيسية ممتازة ودرجة ثبات أفضل من المادة المقساة . وثمن هذه السبيكة أرخص من صلب (KS) .

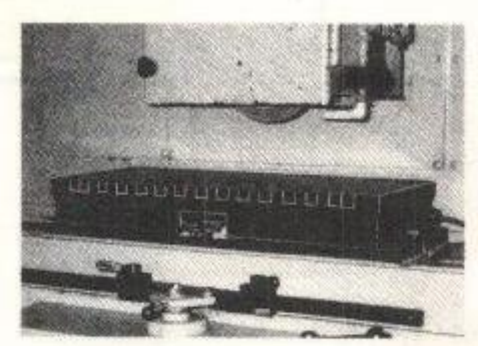
*** صلب (KS) هو سبيكة صلب تحتوى على 6 - 8% تنجستن ، 1 - 3% كروم، 20-36% كوبالت ، 0.7 - 1.5% كربون، وهى أفضل المواد المقساة .

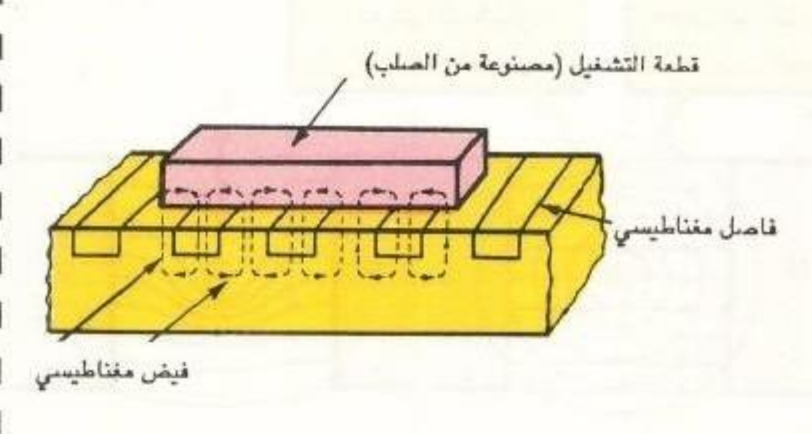
الماسك الكهرومغناطيسي في ماكينة التجليخ السطحي

يمكن للقوة الكهرومغناطيسية إمساك قطعة تشغيل مصنوعة من الصلب باستخدام قوة الجذب الناشئة من مغناطيس كهربائى عند امرار تيار في الملف .

في قمة الماسك الكهرومغناطيسي يوجد قطب مصنوع من الصلب وفاصل مغناطيسي مدفون من النحاس و النحاس الأصفر. توضع المادة المصنوعة من الصلب على أقطاب N وأقطاب S بحيث تغطي الفواصل المغناطيسية، وتثبت إلى الماسك الكهرومغناطيسي بقوة الجذب المتولدة بواسطة الفيض المغناطيسي .

عند زيادة التيار تزيد قوة الجذب وترتفع درجة الحرارة وتسوء دقة العمليات، وتتم إزالة المادة بتغيير اتجاه التيار عدة مرات لإزالة التمغنط المتبقي، حيث إن التمغنط المتبقي يجعل عملية الإزالة صعبة بعد قطع التيار .





الشكل ٢ – ٢٩ الفيض المغناطيسي المتولد

بواسطة الملف الكهرومغناطيسي الداخلي يجذب قطعة التشغيل .

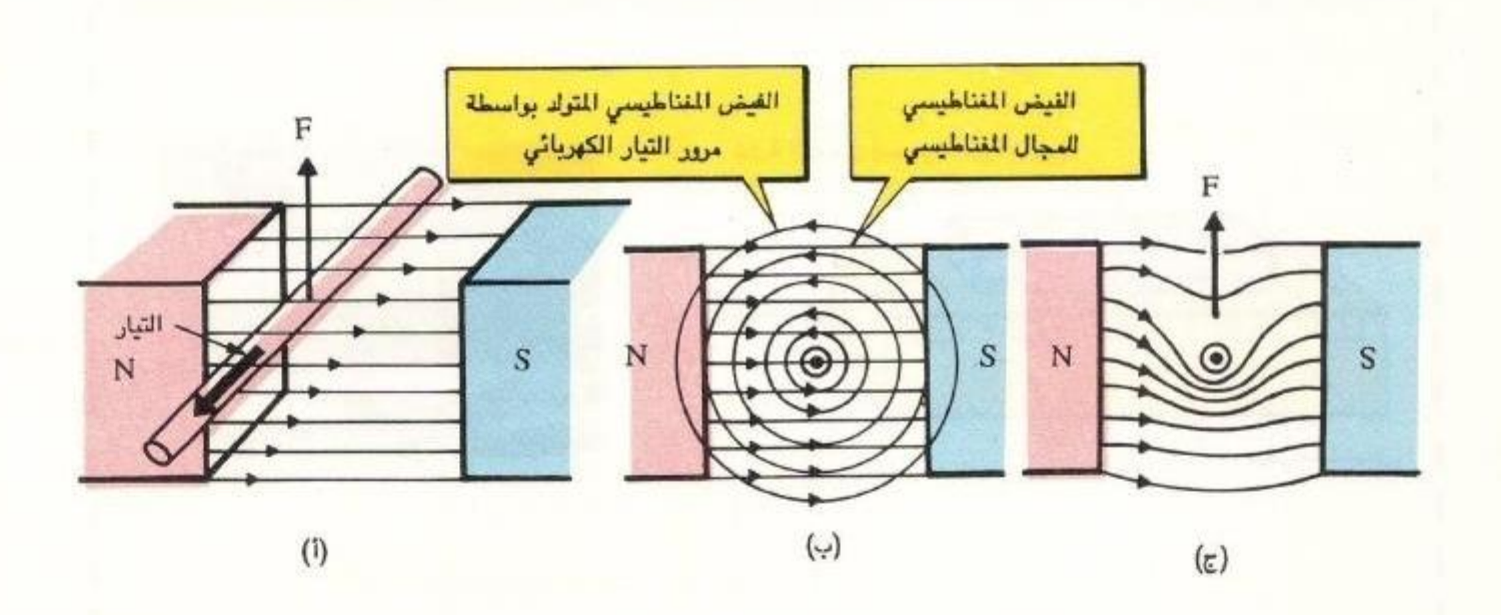
٢ – ٤ القوة الكهرومغناطيسية والمحرك

٢ – ٤ – ١ القوة المؤثرة على تيار كهربائي في مجال مغناطيسى

أ – القوة الكهرومغناطيسية Electromagnetic force

كما في الشكل ٢ – ٣٠ (أ) عند مرور تيار في موصل موضوع في مجال مغناطيسى يتحرك الموصل في اتجاه الأسهم . وهذه الحركة سببها قوة F عمودية على كل من التيار والمجال المغناطيسي .

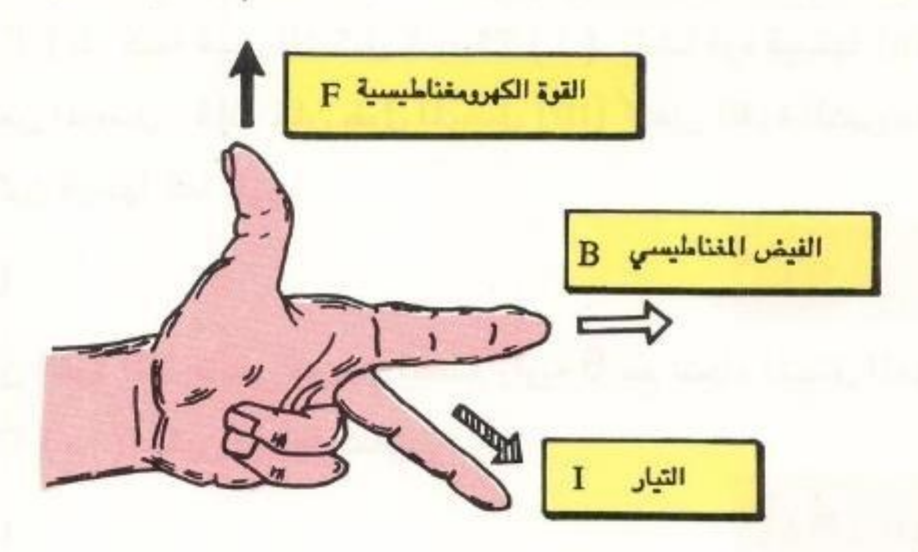
تقوم القوة الكهرومغناطيسية بدفع الموصل إلى أعلى حيث إن محصلة الفيض المغناطيسي تكون قليلة أعلى الموصل، وتكون كبيرة أسفل الموصل كما في الشكل ٢ – ٣٠ (ب) والشكل ٢ – ٣٠ (ج) .



الشكل ٢ – ٣٠ القوة الكهرومغناطيسية

ب- اتجاه وقيمة القوة الكهرومغناطيسية

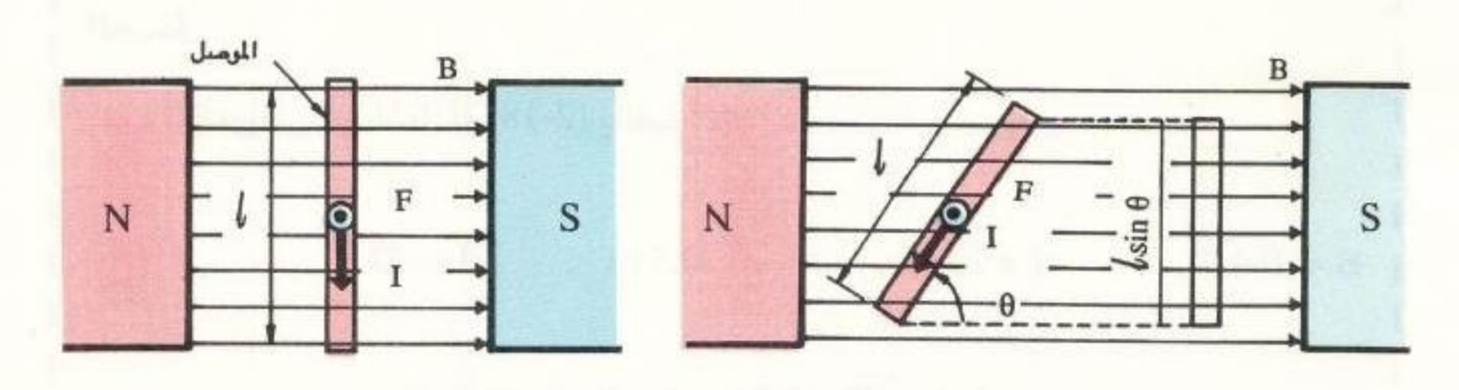
يمكن معرفة اتجاه القوة الكهرومغناطيسية ببساطة باستخدام الطريقة الآتية :



الشكل ٢ – ٣١ قاعدة اليد اليسرى لفلمنج .

Fleming's left hand rule

يبين الشكل ٢ – ٣١ اتجاهات التيار والفيض المغناطيسي والقوة الكهرومغناطيسية والعلاقات بينها . وهى مبينة بالأصابع الوسطى والسبابة والإبهام حيث يتعامد كل إصبع على الإصبعين الآخرين . وهذه العلاقة تسمى قاعدة اليد اليسرى لفلمنج .



(أ) الموصل عمودي على المجال المغناطيسي

(ب) الموصل يصنع زاوية θ مع المجال المغناطيسي

الشكل ٢ – ٣٢ قيمة القوة الكهرومغناطيسية .

يمكن حساب قيمة القوة الكهرومغناطيسية باستخدام المسقط الأفقى لشكل ٢ - ٣٠ (أ) . عند مرور التيار [A] I في موصل عمودى على المجال المغناطيسي*، حيث كثافة الفيض المغناطيسى [T] B كما فى الشكل ٢ - ٣٢ (أ) تنشأ قوة قيمتها $f = BI[N/m]$ لكل 1 متر طولى من الموصل . فإذا كان طول الموصل ℓ [m] فإن القوة الكهرومغناطيسية F[N] المؤثرة عليه تكون قيمتها كما يلى :

$$F = BI\ell \quad [N] \qquad (2-17)$$

وعمومًا فإن القوة المؤثرة على موصل يصنع زاوية θ مع اتجاه المجال المغناطيسي كما في الشكل ٢ - ٣٢ (ب) تكون قيمتها كمايلى :

$$F = BI\ell \sin\theta \quad [N] \qquad (2-18)$$

مثال ٧

يمر تيار قيمته 20أمبير في موصل طوله 50 سم موضوع في مجال مغناطيسى كثافة الفيض المغناطيسي فيه 0.4 تسلا، ويصنع الموصل زاوية قدرها 30 درجة مع اتجاه المجال المغناطيسي . احسب القوة المؤثرة على الموصل .

الحل

نقوم بالتعويض في المعادلة (2-18) بالقيم الآتية :

$B = 0.4\ T$, $I = 20\ A$, $\ell = 0.5\ m$, $\theta = 30^{o}$

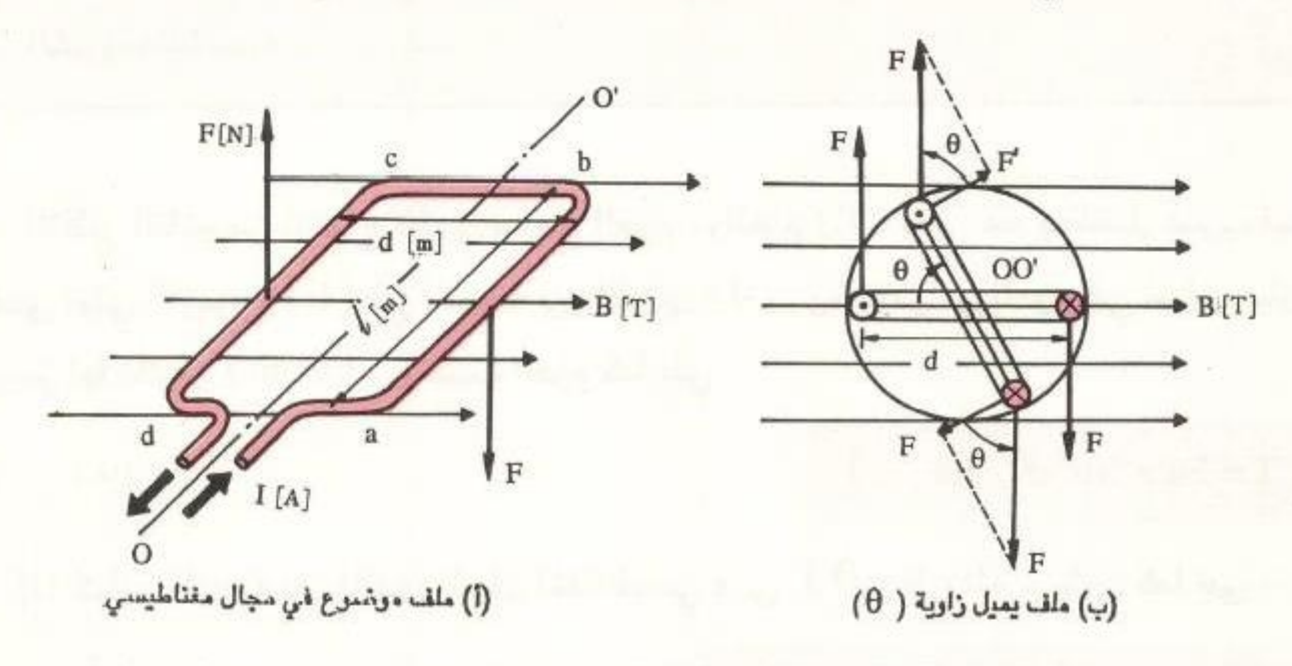
$$F = 0.4 \times 20 \times 0.5 \times \sin 30^{o} = 2\ N$$

سؤال ١٠

في الشكل ٢ – ٣٢ (ب) موصل طوله 1 متر يصنع زاوية 45 درجة مع اتجاه المجال المغناطيسي، وكثافة الفيض المغناطيسي 2 تسلا . احسب التيار المار في الموصل إذا كانت القوة المؤثرة عليه 5 نيوتن .

حـ – القوة المؤثرة على الملف Force acting to coil

يبين الشكل ٢ – ٣٣ (أ) تياراً I [A] يمر في ملف على شكل مستطيل طوله ℓ [m] وعرضه d [m] في مجال مغناطيسى منتظم كثافة الفيض المغناطيسي به B [T] .



الشكل ٢ – ٣٣ القوة الكهرومغناطيسية المؤثرة على ملف موضوع في مجال مغناطيسى

الجانبان (ab) ، (cd) للملف عموديان على المجال المغناطيسي، وتؤثر عليهما القوى الكهرومغناطيسية أما الجانبان (ad) , (bc) فهما موازيان للمجال المغناطيسي ولاتؤثر عليهما أية قوى كهرومغناطيسية .

ويمكـن إستخـدام المعادلـة (2-17) لحسـاب قيمـة القوة الكهرومغناطيسية [N] F التى تؤثر على كل من الجانبين (ab) , (cd) للملف كالآتى :

$$F = BI\ell \qquad [N]$$

القوة التي تؤثر على الجانب (ab) تكون معاكسة للقوة التى تؤثر على الجانب (cd) في الاتجاه ومساوية لها في المقدار، وينشأ ازدواج من هذه القوى مركزه المحور ('oo) كما في الشكل ٢ – ٣٣ (ب) .

* بيان الاتجاه كما في الشكل ٢ – ١٤ ينطبق على أية قوة بالإضافة إلى القوة الكهرومغناطيسية .

التأثير الناتج من ازدواج القوى يسمى العزم . والعزم (T) يعبر عنه بحاصل ضرب قيمة إحدى قوتي الازدواج (F) في المسافة بين القوتين (d) . وحدة قياس العزم هي نيوتن. متر . ويرمز لها بالرمز [N. m] . ويحسب العزم كما يلي :

$$T = Fd = BI\ell\, d \quad [N\,.\,m] \qquad (2-19)$$

إذا كـانت الزاوية بين الملف والمجال المغناطيسي هـى (θ) فإن العزم يكون كما يلى :

$$T = Fd = BI\ell\, d \cos\theta \quad [N\,.\,m] \qquad (2-20)$$

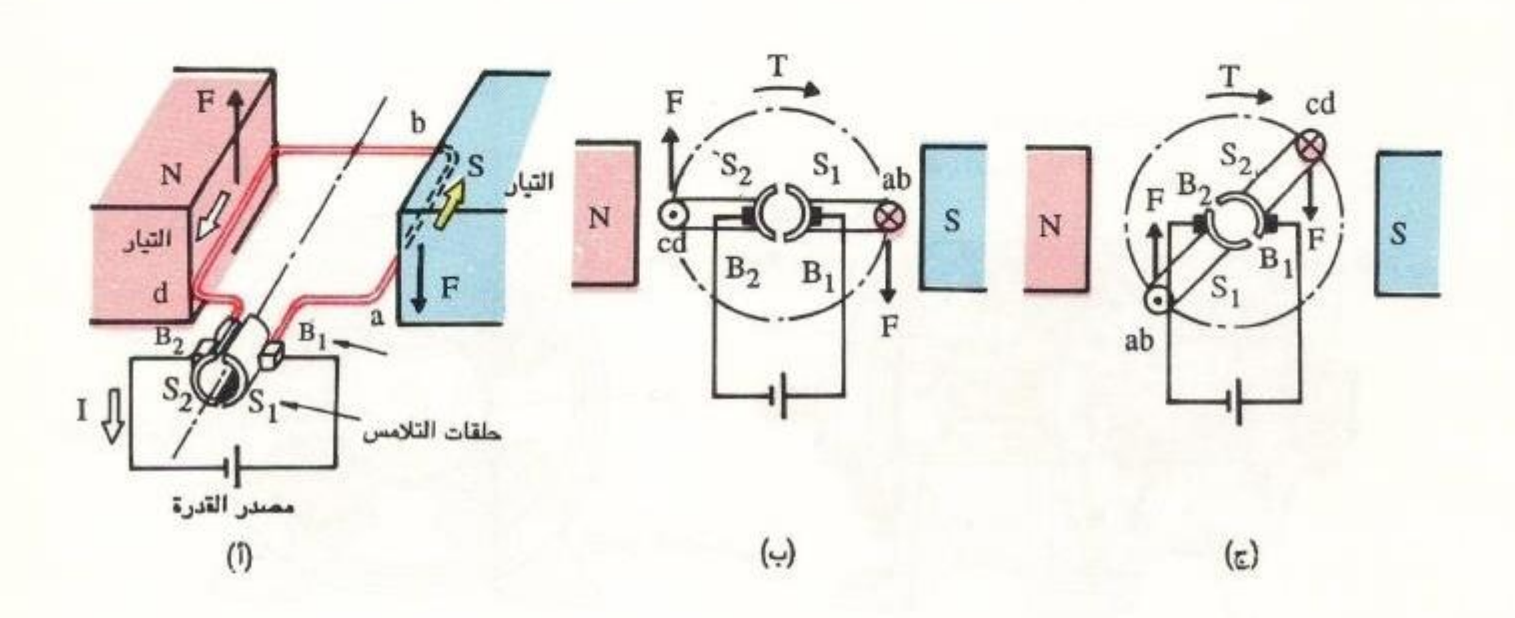
إذا كان عدد لفات الملف (N) يكون العزم الكلى N مضروبًا في القيمة المحسوبة من المعادلة (2-20) .

يستخدم هذا المبدأ في عمل المحرك والأدوات الكهربائية.

د – محرك التيار المستمر Direct current motor

كما في شكل ٢ – ٣٤ يدور ملف على شكل مستطيل بحرية في مجال مغناطيسى . وتوجد حلقات تلامس (S_1) , (S_2) مصنوعة من شرائح معدنية ولها شكل نصف اسطوانة تتلامس معها الفرش (B_1) , (B_2) .

عند مرور التيار في الملف في الاتجاه المبين بالشكل ٢ – ٣٤ (أ) تتولد قوة دافعة كهربائية (F) في اتجاه يتحدد طبقًا لقاعدة اليد اليسرى لفلمنج في الجوانب (ab) ، (cd) . وهكذا فإن العزم (T) يؤثر في الاتجاه المبين بالشكل ٢ – ٣٤ (ج) . تتغير حلقات تلامس (S_1) , (S_2) مع كل من (B 1) , (B 2) مما يجعل التيار يمر في اتجاه عكسي . وهكذا يعمل العزم في الاتجاه نفسه دائمًا مما يجعل الملف يستمر في الدوران . وهذا هو مبدأ عمل محرك التيار المستمر .



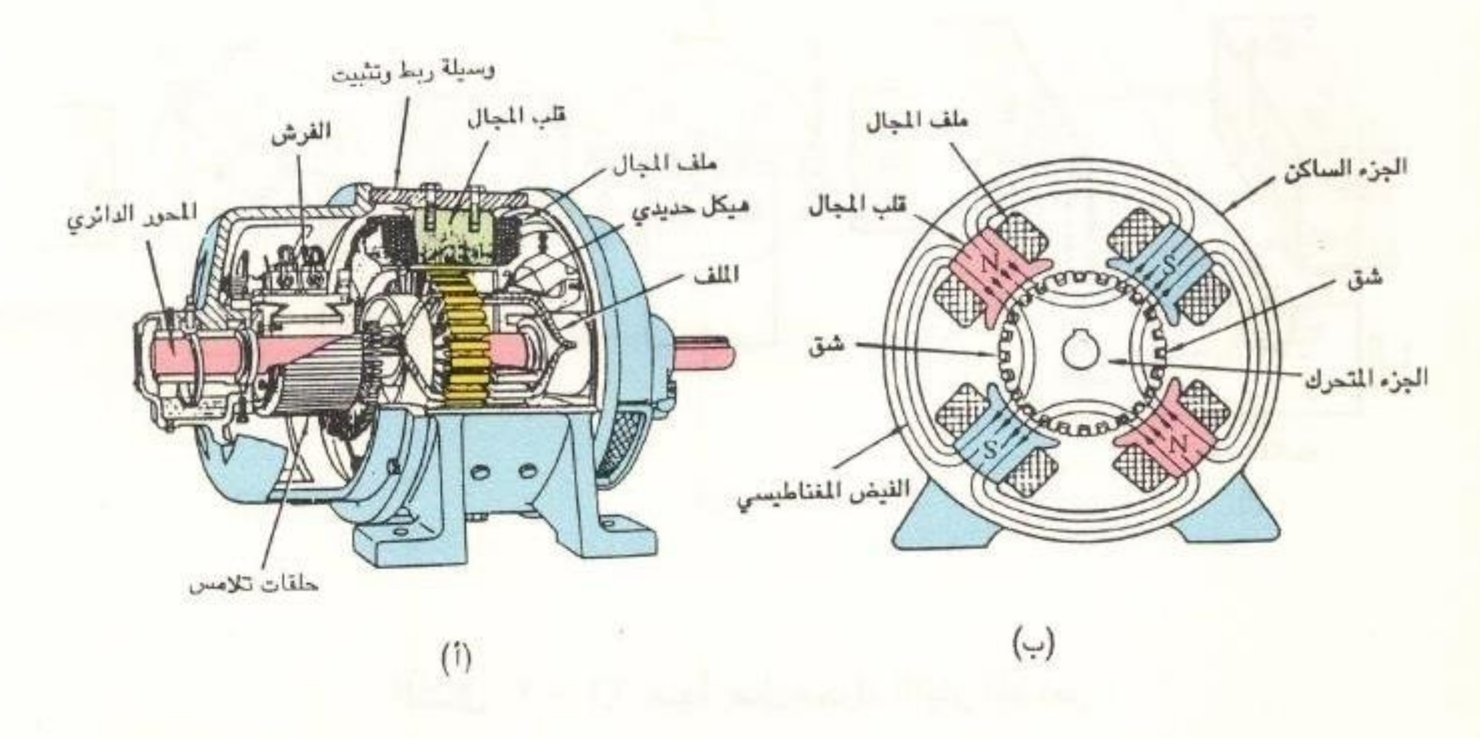
الشكل ٢ – ٣٤ مبدأ عمل محرك التيار المستمر .

يبين الشكل ٢ – ٣٥ تركيب محرك التيار المستمر حيث يحتوى هذا المحرك على جزء ثابت يقوم بتوليد الفيض المغناطيسي، وجزء متحرك يدور فيقطع الفيض المغناطيسي. ويحتــوى الجــزء الثابـت علــى نظام المجال ووسيلة ربط وتثبيت ؛ أما الجـزء المتحرك فيحتوى على هيكل حديدي وحلقات تلامس (أو مبدلات) .

نظام المجال الذى يقوم بتوليد الفيض المغناطيسي هو مغناطيس كهربائي ، ويوجد الملف حول قلب حديدى أما أقطاب S , N فهى منظمة بالتناوب .

تحتوي وسيلة الربط والتثبيت على الدائرة المغناطيسية التي تمرر الفيض المغناطيسي وفى الوقت نفسه تكون الغلاف الخارجي .

يبين الشكل ٢ – ٣٥ (ب) مبدأ عمل محرك التيار المستمر . أما المحرك الفعلى فله عدد أكبر من الأقطاب . والشكل ٢ – ٣٥ (أ) يبين قطاع واحد فقط لنظام المجال يتكون من قلب حديدى وملف .



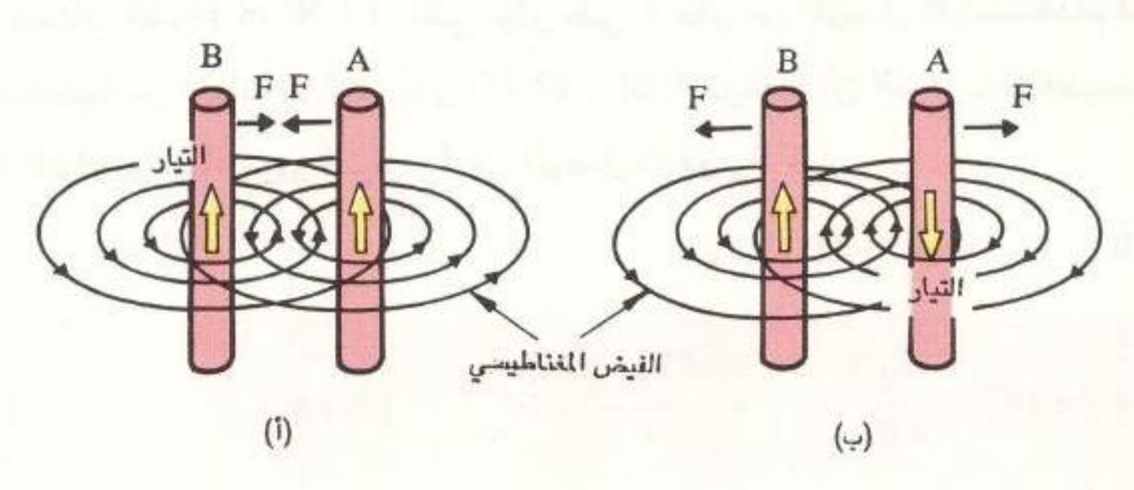
الشكل ٢ – ٣٥ تركيب محرك التيار المستمر

ويتكون الهيكل من قلب حديدى مثبت إلى محور بالإضافة إلى ملف . في المحرك الفعلي هناك عدد كبير من الملفات موزعة في أخاديد (تسمى شقوق الهيكل الحديدى) فى القلب الحديدى مع اختلاف قليل في وضع كل ملف عن الملف المجاور له . والعزم الناتج المتولد بواسطة كل هذه الملفات يعطى قوة دوران شديدة .

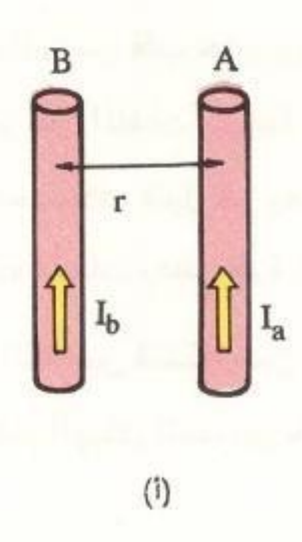
أما حلقات التلامس فتتكون من عدد من الشرائح المنظمة في شكل أسطوانة تسمح للتيار بالمرور إلى ملفات الهيكل الحديدى خلال الفرش التي تلامس هذه الحلقات .

٢ - ٤ - ٢ القوة المؤثرة على موصلات يمر بها تيار

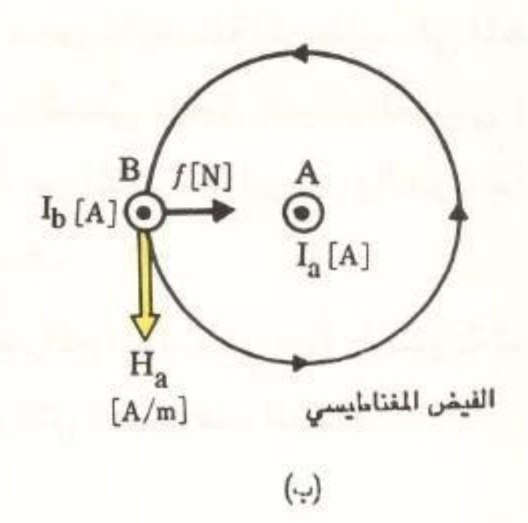
في الشكل ٢ - ٣٦ يتسبب مرور التيار خلال موصلين متوازيين في ظهور قوة تؤثر على الموصلين . هذه القوه هي قوة كهرومغناطيسية تتولد عبر المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الأول والتيار الثانى . إذا كان التياران لهما الاتجاه نفسه تحدث قوة تجاذب بين الموصلين أما إذا كان التياران في اتجاهين متضادين فتحدث قوة تنافر بين الموصلين . ويمكن شرح هذه الظاهرة عن طريق تجميع الفيض المغناطيسي . فمثلاً في الشكل ٢ - ٣٦ (أ) تنتظم الفيوض المغناطيسية خارج الموصلين فتزداد كثافتها أما بين الموصلين فتكون الفيوض المغناطيسية معاكسة لبعضها مما يؤدي إلى إنقاص كثافتها . وينشأ عن ذلك قوة تجاذب بين الموصلين .



الشكل ٢ - ٣٦ اتجاه القوى المؤثرة على موصلين متوازيين بهما تيار .



(أ)



(ب)

الشكل ٢ – ٣٧ قيمة القوى المؤثرة على موصلين متوازيين بهما تيار .

في الشكل ٢ – ٣٧ (أ) المسافة بين الموصلين المتوازيين الخطيين A , B هي [m] r والتيار المار بهما في الاتجاه نفسه هو $I_b[A]$, I_a [A] على الترتيب . ويبين الشكل ٢ – ٣٧ (ب) اتجاه المجال المغناطيسي عند الموصل B المتولد بواسطة مرور التيار I_a فى الموصل A وقيمة هذا المجال H_a [A / m] يمكن حسابها من المعادلة (2-8) كما يلي :

$$H_a = \frac{I_a}{2\pi r} \quad [A/m]$$

يمكن حساب القوة [f [N/ m التى تؤثر على 1 متر من الموصل Bباستخدام المعادلة التالية المستنتجة من المعادلات (16-2) و (17-2) . إذا افترضنا أن الفيض المغناطيسي عند الموصل B المتولد بواسطة مرور التيار I_a فى الموصل A هو B_a فإن:

$$f = B_a I_b = \mu_o H_a I_b$$

$$= 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{I_a}{2\pi r} \times I_b = \frac{2 I_a I_b}{r} \times 10^{-7} \quad [N/m] \qquad (2-21)$$

وبالمثل فإن المجال المغناطيسي المتولد بواسطة مرور التيار I_b فى الموصل B ينشأ عنه قوة تؤثر على الموصل A وقيمتها كما في المعادلة (21 - 2) .

وحدة قياس التيار الكهربائي الأمبير، ويرمز لها بالرمز { A } يمكن تعريفها باستخدام المعادلة (21 - 2) كما يلى : 1 أمبير هي شدة التيار الذى إذا مر خلال موصلين متوازيين طولهما لانهائي والمسافة بينهما 1 متر في الفراغ أدى ذلك إلى ظهور قوة تؤثر على الموصلين قيمتها 2×10^{-7} نيوتن لكل 1 متر طول .

سؤال١١

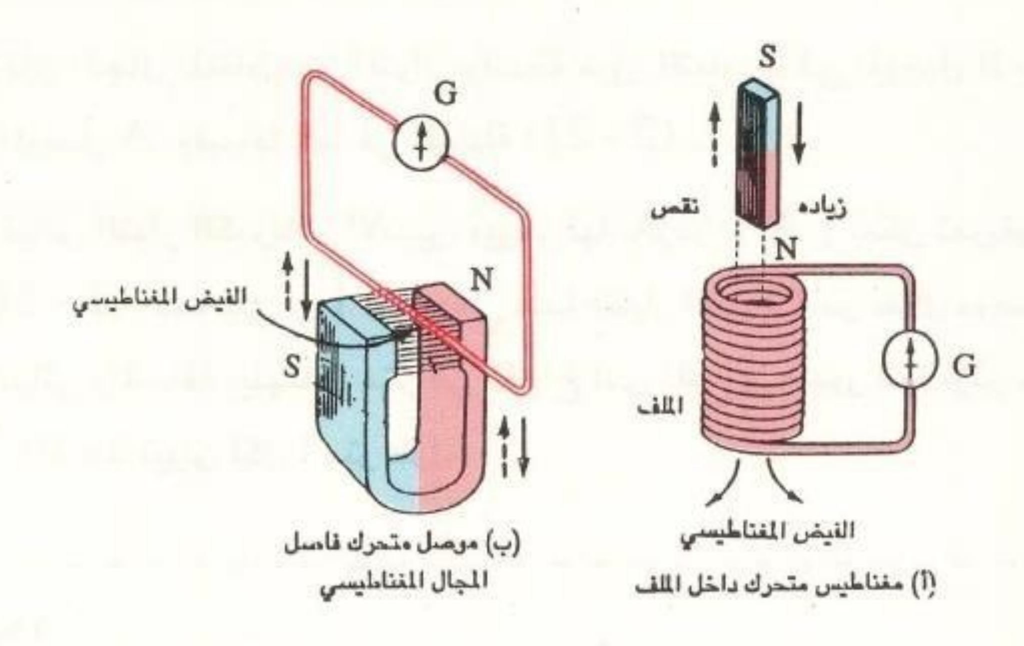
موصلان متوازيان في الهواء المسافة بينهما 5 سم، ويمر خلال كل منهما تيار قيمته 0.1 أمبير . احسب القوة المؤثرة على 1 متر من الموصل .

٢ – ٥ الحث الكهرومغناطيسى والمولد

Electromagnetic Induction and Generator

٢ – ٥ – ١ الحث الكهرومغناطيسى

عند تحريك مغناطيس داخل وخارج ملف كما في الشكل ٢ – ٣٨ (أ) أو عند تحريك موصل داخل مجال مغناطيسي كما في الشكل ٢ – ٣٨ (ب) يتأرجح مؤشر الجلفانومتر مما يدل على مرور تيار . وهذه الظاهره سببها أن عدد الفيض المغناطيسي الذى يمر خلال الملف يتغير مع الزمن، أو أن قطع الفيض المغناطيسي بواسطة الموصل يؤدي إلى ظهور قوة دافعة كهربائية في الملف أو الموصل . هذه الظاهرة تسمى الحث الكهرومغناطيسي وفيها تتولد قوة دافعة كهربائية عن طريق الحث ويسمى التيار المار (التيار الحثي) .



الشكل ٢ – ٣٨ الحث الكهرومغناطيسي

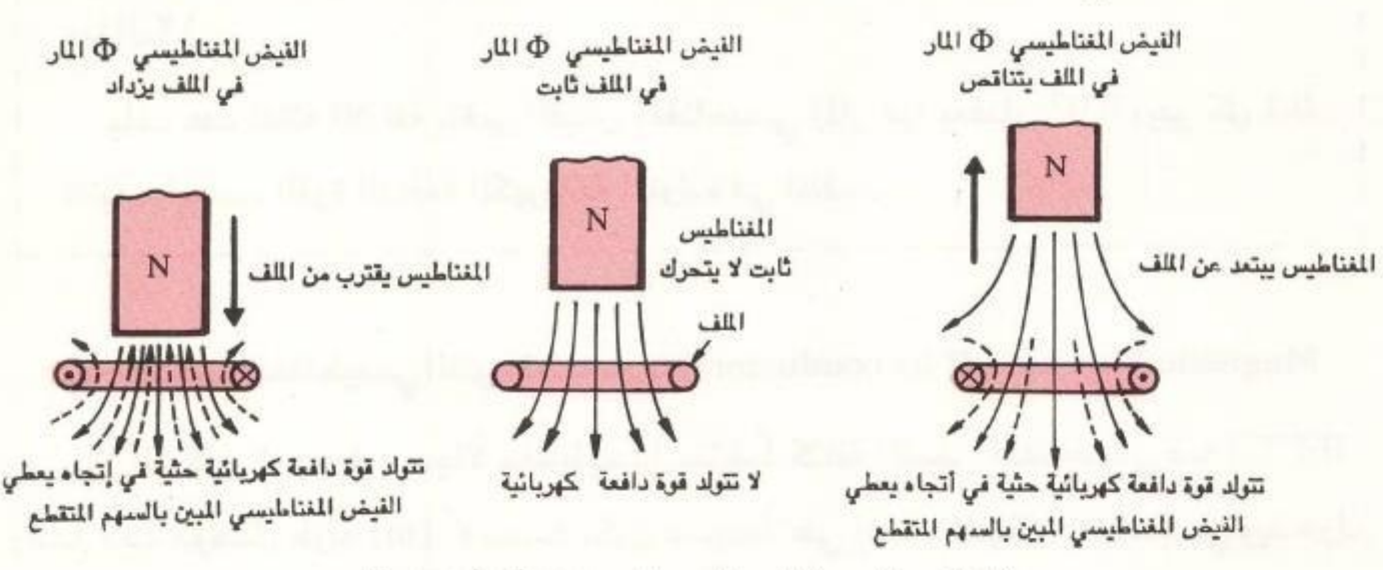
٢ – ٥ – ٢ اتجاه وقيمة القوة الدافعة الكهربائية الحثية

أ – التغير في الفيض المغناطيسي المار بملف

فى التجربة المبينة في الشكل ٢ – ٣٨ (أ) نجد أن زيادة سرعة تحريك المغناطيس أو زيادة عدد لفات الملف تؤدى إلى زيادة تأرجح مؤشر الجلفانومتر G . أي إن قيمة القوة الكهرومغناطيسية المتولدة بالحث الكهرومغناطيسي تتناسب مع حاصل ضرب (معدل تغير كمية الفيض المغناطيسي المار في الملف بالنسبة للزمن) في عدد لفات الملف . هذه العلاقة هي قانون فاراداى للحث الكهرومغناطيسي، فعندما يتغير الفيض المغناطيسي المار في ملف عدد لفاته Nبانتظام بمقدار $\Delta\Phi[Wp]$ خلال مدة زمنية $\Delta t\ [S]$ تتولد القوة الدافعة الكهربائية الحثية $e\ [\ V\ ]$ طبقًا للمعادلة :

$$e = -N\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \qquad [V] \qquad (2-22)$$

يبين الشكل ٢ – ٣٩ أن القوة الدافعة الكهربائية الحثية تعكس اتجاهها عندما يتحول التغير الحادث في الفيض المغناطيسي Φ من الازدياد الى التناقص . أي إن القوة الدافعة الكهربائية الحثية تكون في اتجاه بحيث تمنع تغير قيمة الفيض المغناطيسي الأصلي بواسطة الفيض المغناطيسي المتولد نتيجة مرور تيار القوة الدافعة الكهربائية الحثية وهذا هو قانون لنز.



الشكل ٢ – ٣٩ قانون لنز Lenz's law

الإشارة السالبة في المعادلة (22 - 2) تعنى أن القوة الدافعة الكهربائية الحثية تحدث في اتجاه بحيث تمنع تغير الفيض المغناطيسي .

مثال ٨

عند تغير الفيض المغناطيسي المار في ملف بمعدل 0.5 ويبر خلال 0.2 ثانية تولدت قوة دافعة كهربائية حثية قيمتها 100 ڤولت . احسب عدد لفات الملف N .

الحـــل

نقوم بالتعويض في المعادلة (22 - 2) بالقيم الآتية :

$$e = 100\,V\ ,\ \Delta\Phi = 0.5\ \ Wb\ ,\ \ \Delta t = 0.2\ \ s$$

فنحصل على

$$N = 100 \times \frac{0.2}{0.5} = 40$$

سؤال١٢

ملف عدد لفاته 50 لفة يتغير الفيض المغناطيسي المار فيه بمقدار 0.02 ويبر كل 0.1 ثانية . احسب القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في الملف .

ب – الفيض المغناطيسي الذى يقطعه موصل Magnetic Flux cut off by conductor

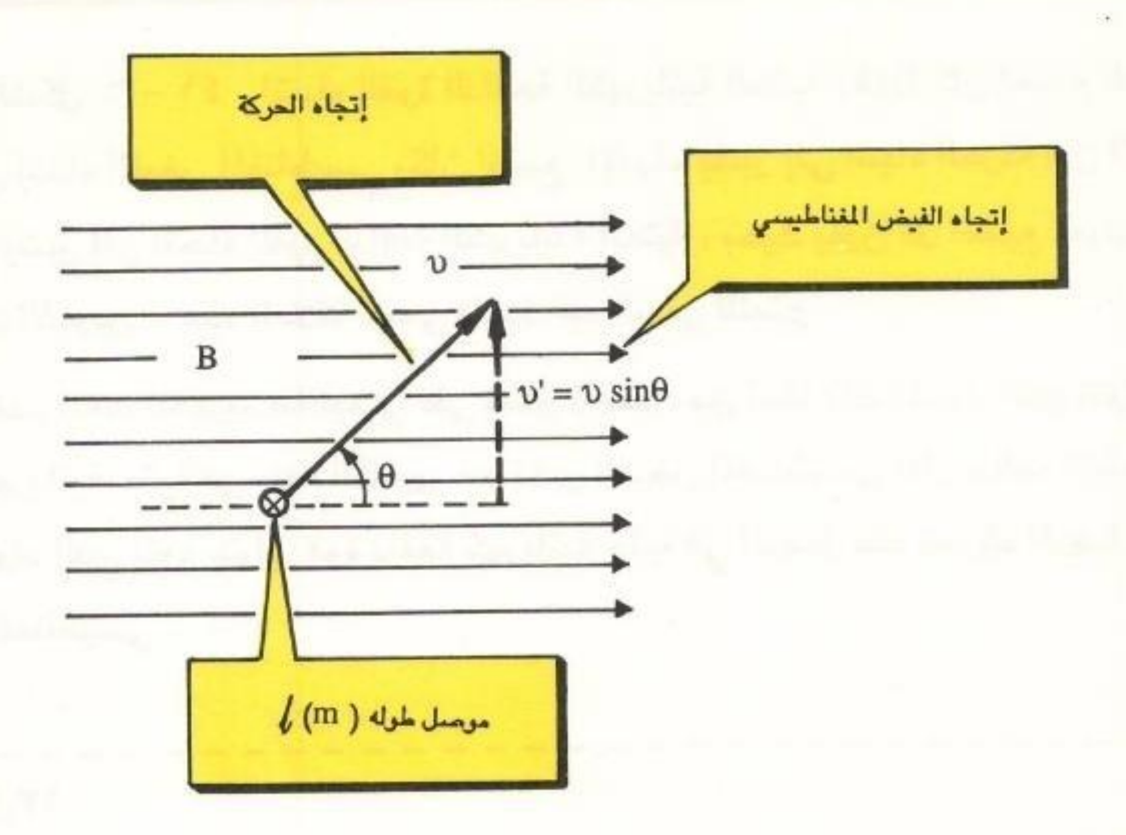
يبين الشكل ٢ – ٤٠ مجالاً مغناطيسيًا منتظمًا كثافة الفيض المغناطيسي فيه B [T] وضع فيه موصل طوله ℓ [m] بحيث يكون عمودياً على إتجاه المجال المغناطيسي ويتحرك الموصل بحيث يصنع زاوية θ مع اتجاه المجال المغناطيسي داخل مستوى بسرعة υ[m/s] .

الفيض المغناطيسى $\Delta \Phi$ [Wb] الذى يقطعه الموصل خلال مدة زمنية Δt [s] هو:

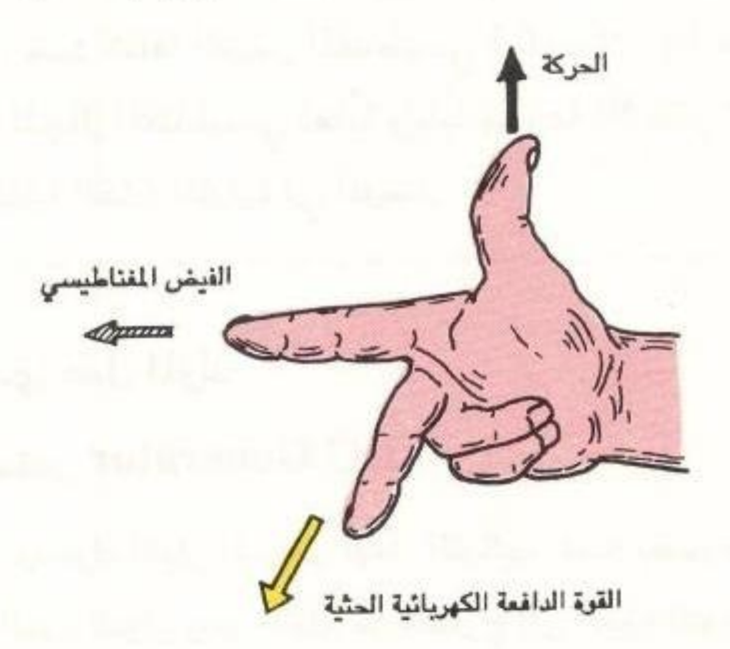
$$\Delta \Phi = B \ell \upsilon' \Delta t = B \ell \upsilon \sin\theta \; \Delta t \quad [Wb]$$

والقوة الدافعة الكهربائية الحثية e [v] المتولدة في الموصل هي :

$$e = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -B \ell \upsilon \sin\theta \quad [V] \qquad (2-23)$$



الشكل ٢ – ٤٠ القوة الدافعة الكهربائية الحثية



الشكل ٢ – ٤١ قاعدة اليد اليمنى لفلمنج .

Fleming's right hand rule

يبين الشكل ٢ – ٤١ اتجاه القوة الدافعة الكهربائية الحثية . فإذا كان إصبع السبابة يشير إلى إتجاه الفيض المغناطيسي وكان إصبع الإبهام يشير إلى اتجاه الحركة فإن الإصبع الوسطى يشير إلى اتجاه القوه الدافعة الكهربائية الحثية ، بحيث يكون كل اصبع عمودياً على الإصبعين الآخرين . هذه العلاقة تسمى قاعدة اليد اليمنى لفلمنج .

يستخدم الحث الكهرومغناطيسي على نطاق واسع . من أمثلة ذلك المحول الذي تتولد قوة دافعة كهربائية حثية في ملفه الثانوى عند تغير الفيض المغناطيسي المار بالملف الابتدائي ، أيضًا المولد الذي يقوم بتوليد قوة دافعة كهربائية حثية في الموصل عند تحريك الموصل داخل الفيض المغناطيسي .

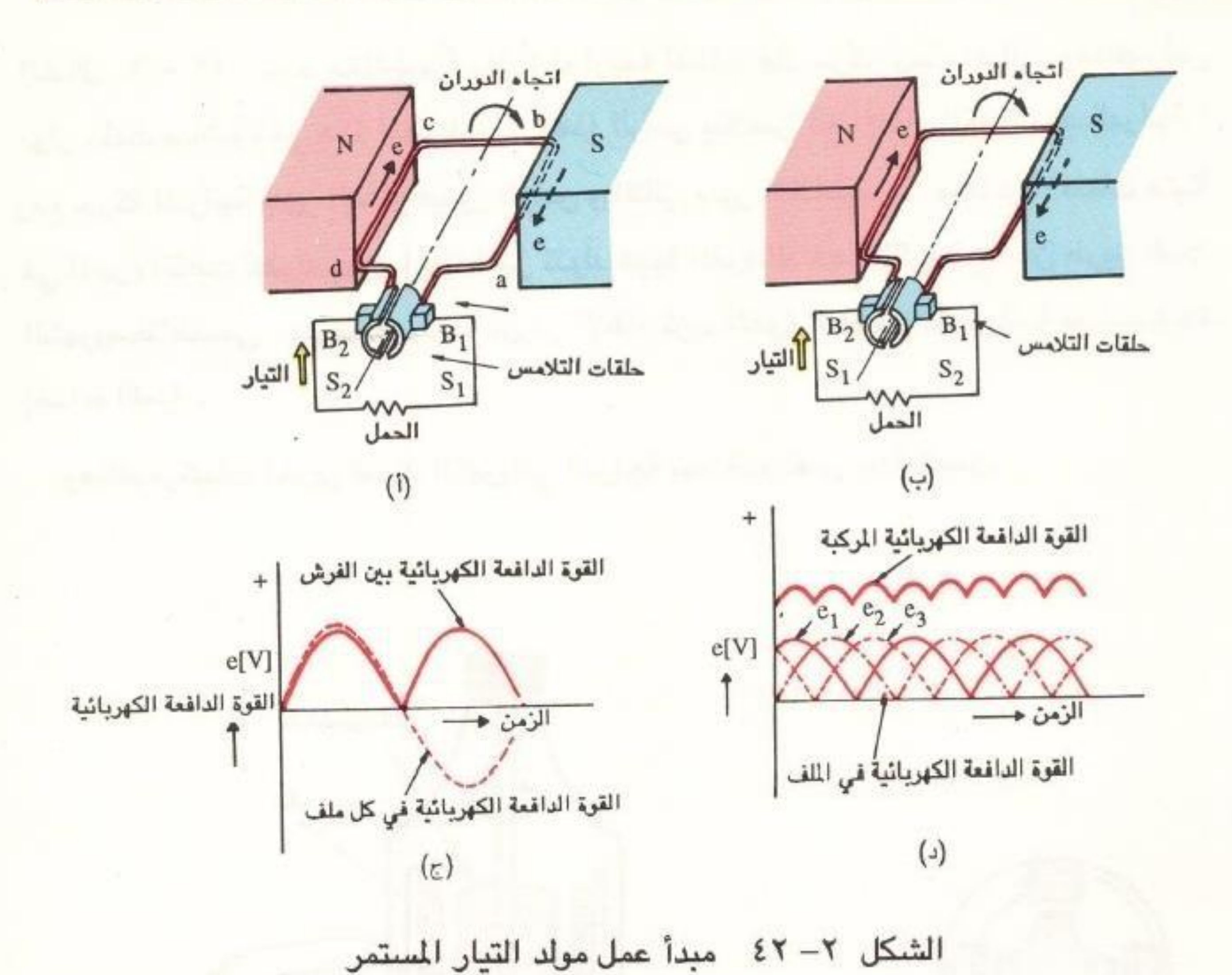
سؤال١٣

موصل طوله 0.2 متر وضع عموديا على اتجاه المجال المغناطيسي في مجال مغناطيسي منتظم ، حيث كثافة الفيض المغناطيسي 0.1 تسلا . إذا حرك هذا الموصل عموديا على اتجاه المجال المغناطيسي ذهابًا وإيابًا بسرعة 50 متر / ثانية . احسب القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الموصل .

٢ – ٥ – ٣ مبادئ عمل المولد

أ – مولد التيار المستمر DC Generator

مولد التيار المستمر ومحرك التيار المستمر لهما التركيب نفسه بصورة أساسية . فنجد في المولد أن المحرك يدير الجزء الدوار ويمر التيار من الخارج إلى الجزء الدوار .



الشكل ٢- ٤٢ مبدأ عمل مولد التيار المستمر

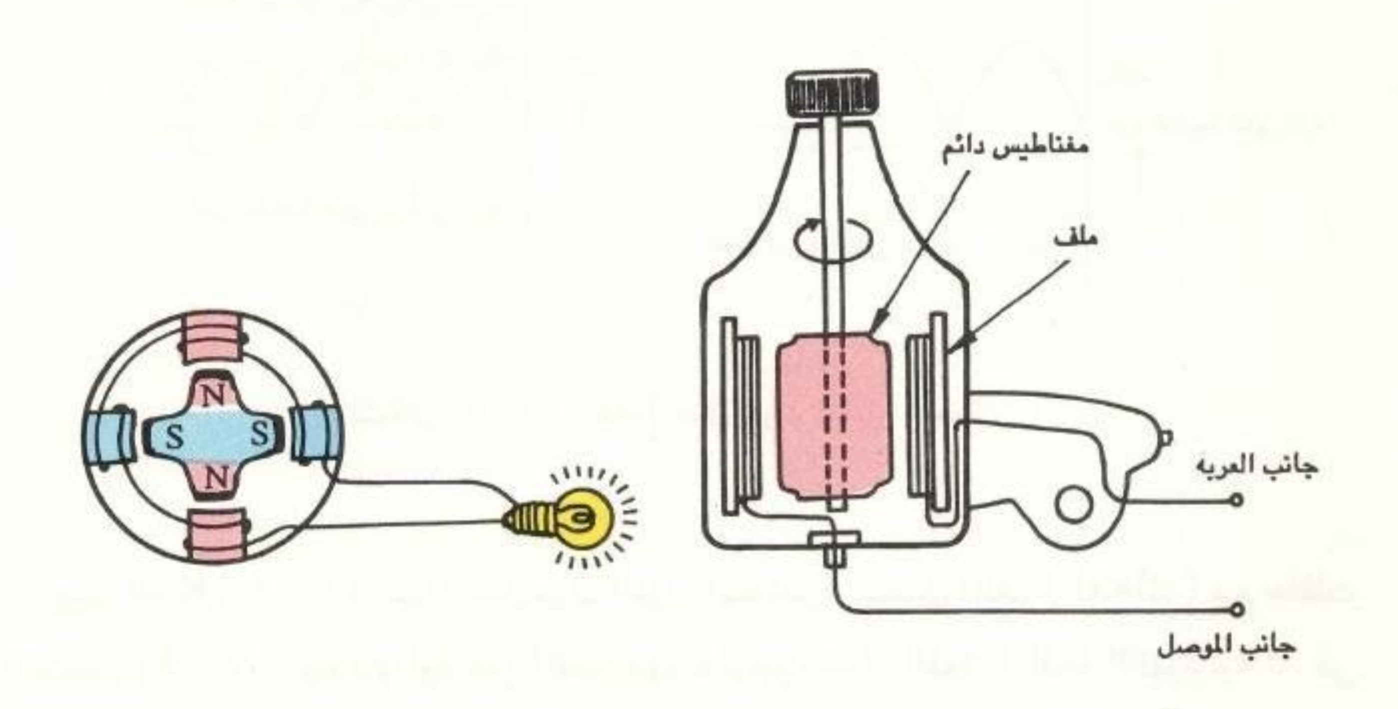
يبين الشكل ٢ – ٤٢ مبدأ عمل مولد التيار المستمر . يتصل الملف (abcd) مع حلقات التلامس S_2 , S_1 . وعند إدارة هذا الملف بقوة خارجية تتولد القوة الدافعة الكهربائية e فى الملف في الاتجاه المبين بالشكل ٢ – ٤٢ (أ) عن طريق الحث الكهرومغناطيسي .

ب – المولد الكهربائي في الدراجة Generator for bicycle

وعلى عكس الشكل ٢ – ٤٢ يوجد مولد كهربائى يستخدم في تغذية لمبة الدراجة ويعتمد عمل هذا المولد على إدارة المغناطيس بدلاً من الملف (أى أن الملف هنا يكون ثابتا). وكما في

الشكل ٢ – ٤٣ نجد مغناطيساً دائماً له أربعة أقطاب عند مركز وعاء المولد . وهناك رأس دوار مثبت مباشرة في هذا المغناطيس، وهذا الرأس يتلامس مع الإطار الكاوتشوك للدراجة ؛ ومع حركة الدراجة يدور الإطار فيدور الرأس وبالتالى يدور المغناطيس . وهناك 4 ملفات مثبتة في الجزء الثابت للمولد حول المغناطيس تتولد فيها القوة الدافعة الكهربائية عن طريق الحث الكهرومغناطيسى . وبزيادة سرعة دوران الإطار تزيد القوة الدافعة الكهربائية فتزيد شدة إضاءة اللمبة .

وهناك تركيبات أخرى للمولد الكهربائي للدراجة تستخدم نفس مبدأ العمل.



الشكل ٢ – ٤٣ المولد الكهربائي في الدراجة

إذا رجعنا إلى الشكل ٢ – ٤٢ نجد أنه عند إدارة الملف بمقدار نصف دورة فإن اتجاه القوة الدافعة الكهربائية في الجوانب (ab) , (cd) يتحول إلى الاتجاه العكسي كما في

الشكل ٢ – ٤٢ (ب) . ومع ذلك فإن القوة الدافعة الكهربائية التى تغذى الدائرة الخارجية والمأخوذة من الفرش B_1 , B_2 يكون لها دائمًا الاتجاه نفسه، كما في الشكل ٢–٤٢ (ج) لأن تلامس الفرش B_1 , B_2 مع حلقات التلامس S_1 , S_2 يتغير بالتناوب كل نصف دورة.

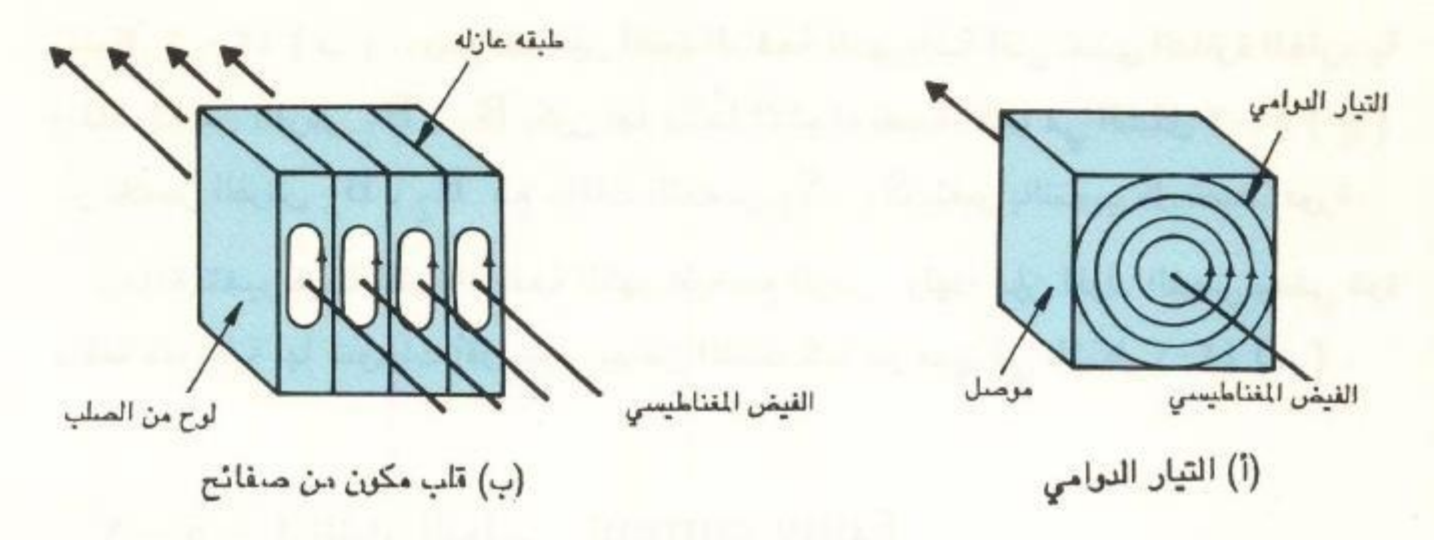
وعادة تتغير قيمة القوة الدافعة الكهربائية مع الزمن . ولهذا فإن المولد الفعلي يعطي قوة دافعة كهربائية لها تموجات أقل مع مزيد من الملفات كما هو مبين في الشكل ٢–٤٢ (د) .

٢ – ٥ – ٤ التيار الدوامي Eddy current

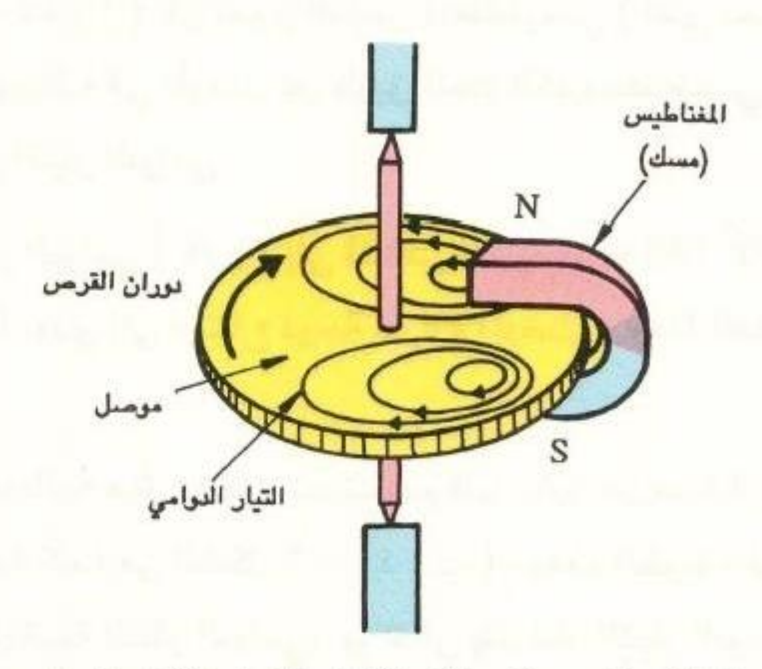
يبين الشكل ٢ – ٤٤ (أ) أن تغير الفيض المغناطيسي (الذي يخترق الموصل) يقوم بتوليد قوة دافعة كهربائية في الموصل عن طريق الحث الكهرومغناطيسي، ينشأ عنها تيار في شكل دوامات يسمى التيار الدوامى .

ويؤدى مرور التيار الدوامي i [A] إلى فقد في القدرة قيمته Ri^2 [W] حيث R [Ω] هى مقاومة المسار ، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الموصل . وهذا الفقد يسمى فقد التيار الدوامي .

في الأدوات الكهربائية مثل المحول نستخدم قلب مكون من صفائح من الصلب الرقيق معزولة عن بعضها كما في الشكل ٢ – ٤٤ (ب) . وهذه الطريقة تجعل مقاومة القلب الحديدى كبيرة فتقل قيمة التيار الدوامي، وبالتالي يقل فقد التيار الدوامي . وتستخدم عادة مواد مثل الفيرايت * (ذات قيمة أقل لفقد التيار الدوامي) فى الدائرة المغناطيسية التى تستخدم تيار تردد عالٍ ؛ لأن فقد التيار الدوامي يتناسب مع مربع التردد .



الشكل ٢ – ٤٤ التيار الدوامى



الشكل ٢ – ٤٥ الفرملة باستخدام التيار الدوامي

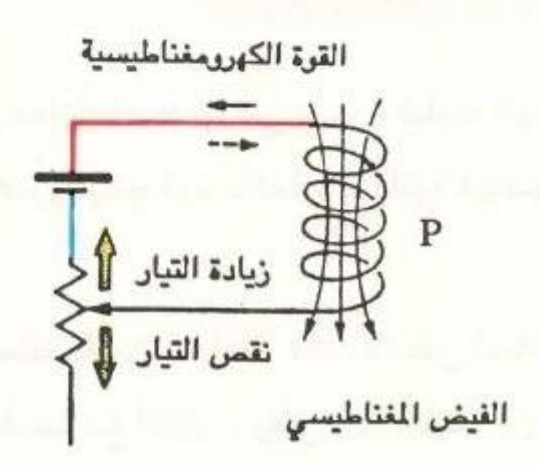
يبين الشكل ٢ – ٤٥ أن دوران موصل على شكل قرص في مجال مغناطيسى يؤدى إلى توليد التيار الدوامي وتقوم القوة الكهرومغناطيسية الناشئة من المجال المغناطيسي بتثبيط وإعاقة حركة دوران القرص ، وتطبق هذه الحقيقة في كبح حركة مقياس الطاقة (الواتميتر) . أضف إلى ذلك أن الحرارة المتولدة نتيجة فقد التيار الدوامي يمكن استخدامها في الأفران الكهربائية التى تعتمد على التسخين عن طريق حث التردد العالى .

* الفيرايت هو مادة مغناطيسية تتكون من أكاسيد النيكل والحديد مصنوعة بطريقة التسخين بدون صهر . ولها مقاومة كهربائية عالية لتقليل فقد التيار الدوامي عند استخدامها في قلب المحول .

٢ – ٦ معامل الحث أو المحاثة Inductance

٢ – ٦ – ١ الحث الذاتي ومعامل الحث الذاتي

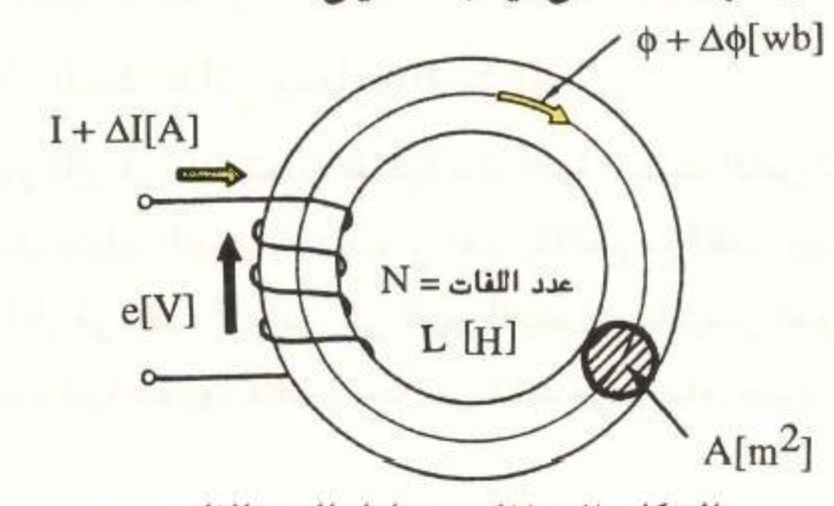
عند تغير التيار المار في ملف تحدث ظاهرة تولد القوة الدافعة الكهربائية في الملف فيقوم التيار المار في الملف بتوليد الفيض المغناطيسي الذى يتقاطع مع الملف. ويبين الشكل ٢ – ٤٦ أن تغيير التيار المار في الملف P يؤدى إلى تغيير الفيض المغناطيسي الذي يتقاطع مع الملف، وينتج عن ذلك توليد قوة كهرومغناطيسية فى الملف في اتجاه بحيث تمنع تغير الفيض المغناطيسي .



الشكل ٢ – ٤٦ الحث الذاتي self induction

هذه الظاهرة تسمى الحث الذاتي والقوة الدافعة الكهربائية المتولدة تسمى القوة الدافعة الكهربائية للحث الذاتي .

يبين الشكل ٢ – ٤٧ أنه عند تغيير التيار المار في ملف عدد لفاته N بمقدار $\Delta I[A]$ خلال مدة زمنية Δt [s] يتغير الفيض المغناطيسي بمقدار $\Delta \Phi$ [W b] ، وتتولد قوة دافعة كهربائية e [V] بالحث الذاتى قيمتها كما يلى :



الشكل ٢ – ٤٧ معامل الحث الذاتى .

$$e = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \ [V] \qquad (2-24)$$

ثابت التناسب L هو معامل الحث الذاتى ووحدة قياسه الهنرى ويرمز له بالرمز [H]. معامل حث ذاتى قيمته 1 هنرى ينتج قوة دافعة كهربائية قيمتها 1 ڤولت عند تغير التيار بمعدل 1 أمبير / ثانية .

العلاقة $(N\Phi = LI)$ مستنتجة من المعادلة (2-24) على أساس أن قيمة النفاذية μ ثابتة، وأن الفيض المغناطيسي يتناسب مع التيار . وعلى هذا يمكننا أن نعبر عن L كما يلى:

$$L = \frac{N\Phi}{I} \ [H] \qquad (2-25)$$

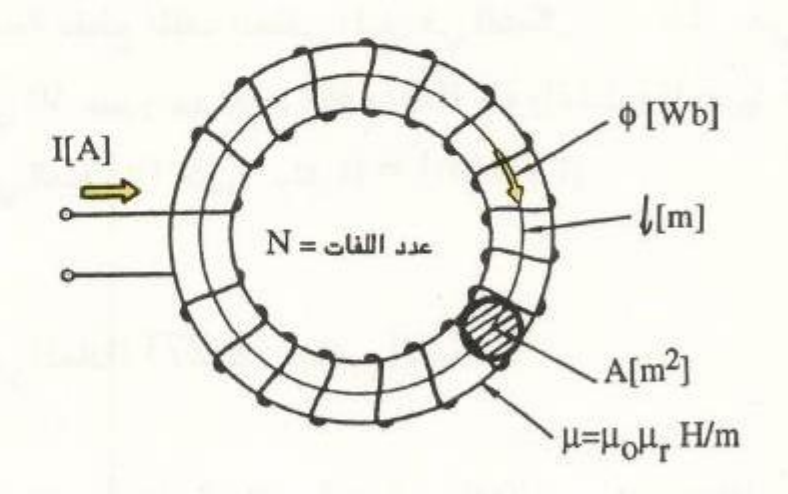
تعتمد قيمة معامل الحث الذاتى للملف على شكله وعدد لفاته ونفاذية مادة المسار المغناطيسي.

المقاومة المغناطيسية تحسب بقسمة القوة الدافعة على الفيض المغناطيسي، ووحدة قياسها هـى [A/ Wb] . ومع ذلك فـإن وحدة قياسهـا تكتب فـى الصـورة $[H^{-1}]$ فـى المعادلـة (2-11) لأن [Wb / A] = [H] من المعادلة (2-25) .

٢ – ٦ – ٢ معامل الحث الذاتي للملف

أ – معامل الحث الذاتي لملف حلقي

يمكن حساب معامل الحث الذاتي للملف الحلقى المبين في الشكل ٢ – ٤٨ كما يلي:



الشكل ٢ – ٤٨ معامل الحث الذاتى لملف حلقى

عندما يمر التيار I [A] في ملف عدد لفاته N ومساحة مقطـع المـسار المغـناطيـسي $A[m^2]$ وطول المسار المغناطيسي[m] ℓ والنفادية [H / m] μ ينتج فيض مغناطيسي ϕ [Wb] في الدائرة المغناطيسية ، ويمكن حساب قيمة هذا الفيض باستخدام المعادلة المستنتجة من العلاقات (2-14) و (2-15) و (2-16) كما يلي :

$$\Phi = BA = \mu HA = \frac{\mu NIA}{l} \quad [Wb] \qquad (2-26)$$

ولهذا فإن معامل الحث الذاتي [H] L يمكن التعبير عنه بالمعادلة المستنتجة من العلاقة (25 – 2) كما يلي :

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \frac{\mu AN^2}{l} \quad [H] \qquad (2-27)$$

مثال ٩

إذا كانت مساحة مقطع الملف الحلقي المبين في الشكل ٢ – ٤٨ هي 5 سم٢ وطول المسار المغناطيسي 50 سم وعدد لفات الملف 1000 لفة والنفاذية النسبية 1000 . احسب معامل الحث الذاتي للملف إذا كان $\mu\ [H/m] = \mu_o \mu_r$.

الحـــل

نقوم بالتعويض في المعادلة (2-27) بالقيم الآتية :

$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m , $\mu_r = 1000$, $A = 5 \times 10^{-4}$ m^2 , $N = 1000$, $l = 0.5$ m

فنحصل على :

$$L = 4\pi \times 10^{-7} \times 1000 \times 5 \times 10^{-4} \times \frac{(1000)^2}{0.5} = 1.26 \quad H$$

سؤال ١٤

عند مرور تيار قيمته 5 أمبير في ملف حلقى عدد لفاته 800 لفة حدث فيض مغناطيسى قيمته $2x10^{-5}$ ويبر . احسب معامل الحث الذاتى للملف .

ب – معامل الحث الذاتي لملف أسطواني

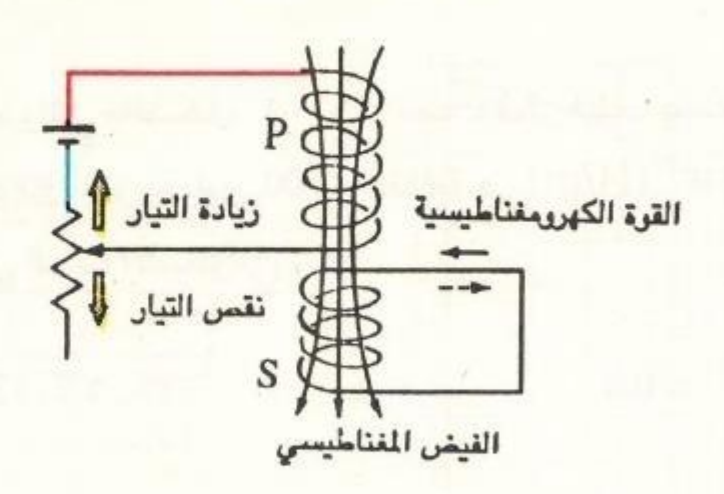
Self-inductauce of cylindrical coil

إذا كانت المادة التي يخترقها المسار المغناطيسي للملف هي الهواء يكون لدينا قلب هوائي. يبين الشكل ٢ – ٤٩ (أ) ملف أسطواني له قلب هوائي وطول لانهائي . عدد لفات هذا الملف هو N لفة لكل 1 متر طولي . ومساحة مقطعه $A\ (m^2)$ ونصف قطره $r\ (m)$ وقيمة النفاذية $\mu\ (H/m)$. إذا مر في هذا الملف تيار $I\ (A)$ فإن الفيض المغناطيسي $\phi\ (Wb)$ داخل الملف يمكن حسابه من المعادلة الآتية، وهى مستنتجة من المعادلة (2-9) و(2-16) .

$$\phi = BA = \mu HA = \frac{\mu NIA}{l} = \frac{\mu \pi r^2 \ NI}{l} \ (Wb) \qquad (2-28)$$

ولهذا فإن معامل الحث الذاتى يمكن حسابه من المعادلة الآتية المستنتجة من المعادلة (2-25) :

$$L = \frac{N\phi}{I} = \frac{\mu AN^2}{l} = \frac{\mu \pi r^2 N^2}{l} \ (H) \qquad (2-29)$$



الشكل ٢ – ٥٠ الحث المتبادل

الملف p هو الملف الابتدائي والملف S الذي حدثت فيه القوة الدافعة الكهربائية عن طريق الحث المتبادل هو الملف الثانوي .

يبين الشكل ٢ – ٥١ الملف الابتدائي p وعدد لفاته N_1 والملف الثانوى S وعدد لفاته N_2 . عند تغيير التيار$I_1(A)$ فى الملف الإبتدائى بمقدار $\Delta I_1(A)$ خلال مدة زمنية $\Delta t(s)$ يتغيير الفيض المغناطيسي ϕ (Wb) الذى يعبر إلى الملف الثانوي S بمقدار $\Delta\phi$ (Wb).
يمكن التعبير عن القوة الدافعة الكهربائية e_2 (V) المتولدة في الملف الثانوى S بالمعادلة الآتية المستنتجة من المعادلة (2-22) .

$$e_2 = -N_2 \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (V) \qquad (2-31)$$

وحيث إن الفيض المغناطيسي($N_2\Delta\phi$) يتناسب مع التيار (ΔI_1) يمكننا استنتاج المعادلة :

$$e_2 = -N_2 \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad (V) \qquad (2-32)$$

مثال ١٠

في الملف الأسطواني بالشكل ٢ – ٤٩ نصف قطر الملف يساوى 2 سم وطوله 10سم وعدد اللفات لكل متر يساوى 100 والنفاذية هي(H/m) $4\pi \times 10^{-7}$. احسب معامل الحث الذاتى للملف الأسطواني .

الحـل :

$$\frac{2r}{\ell} = \frac{2 \times 2}{10} = 0.4$$

من الشكل ٢ – ٤٩ (ب) نجد أنه عند $2r/\ell = 0.4$ فإن $\lambda = 0.85$.

نقوم بتعويض القيم الآتية في المعادلة (2-30) .

$$\lambda = 0.85\,,\ \mu = 4\,\pi \times 10^{-7}\ (H/m),\ r = 2 \times 10^{-2}\ m\,,\ N = 100\,,\ \ell = 0.1m$$

فنحصل على

$$L = 0.85 \times \frac{4\pi \times 10^{-7} \times \pi \times (2 \times 10^{-2})^2}{0.1} \times (100)^2 = 134 \times 10^{-6}\ H = 134\ \mu\ H$$

سؤال ١٥

في الملف الأسطوانى في مثال ١٠ ، احسب معامل الحث الذاتي إذا كان نصف قطر الملف يساوي 4.5 سم .

٢ – ٦ – ٣ الحث المتبادل Mutual induction ومعامل الحث المتبادل

يبين الشكل ٢ – ٥٠ أنه عند تغيير التيارالمار في الملف P يتغير الفيض المغناطيسي الذى يعبر من الملف P إلى الملف S القريب من P وتنتج قوة دافعة كهربائية في الملف الآخر S .
أي إن تغير التيار المار في أحد الملفين يؤدي إلى توليد قوة دافعة كهربائية في الملف الآخر عن طريق ظاهرة الحث المتبادل .

$$M = \frac{N_2 \phi}{I_1} = \frac{\mu A N_1 N_2}{\ell} \quad (H) \qquad (2-35)$$

يتناسب معامل الحث الذاتي $L\ (H)$ فى المعادلة (2-27) مع مربع عدد لفات الملف (N^2). ويتناسب معامل الحث المتبادل $M\ (H)$ في المعادلة (2-35) مع حاصل ضرب عدد لفات الملف الابتدائي(N_1) في عدد لفات الملف الثانوى (N_2) . وثابت التناسب في هذه الحالة هو ($\mu A/\ell$) الذى يتحدد بطول المسار المغناطيسي $\ell(m)$ ومساحة المقطع $A(m^2)$ والنفاذية $\mu\ (H/m)$.

مثال ١١

فى الشكل ٢ – ٥١ مساحة المقطع 5 سم ٢ وطول المسار المغناطيسي 50 سم وعدد لفات الملف الإبتدائى 1000 وعدد لفات الملف الثانوي 3000 والنفاذية النسبية 1000 . احسب معامل الحث المتبادل .

الحل

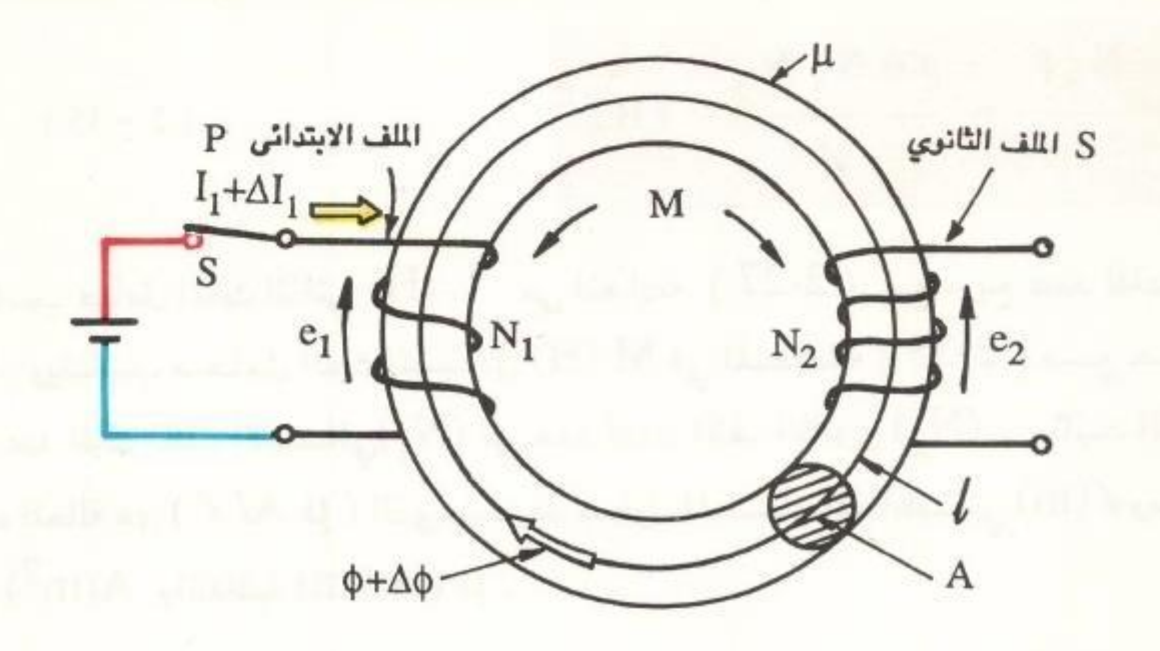
نقوم بالتعويض بالقيم الآتية في المعادلة (2-35) :

$$\mu = \mu_o\ \mu_r = 4\pi \times 10^{-7} \times 1000 = 4\pi \times 10^{-4}\ \ H/m$$

$$A = 5 \times 10^{-4}\ m^2,\ \ N_1 = 1000,\ \ N_2 = 3000,\ \ \ell = 0.5\ m$$

فنحصل على :

$$M = 4\pi \times 10^{-4} \times 5 \times 10^{-4} \times 1000 \times 3000 \times \frac{1}{0.5} = 3.8 \quad H$$



الشكل ٢ – ٥١ معامل الحث المتبادل

في المعادلة (2-32) ثابت التناسب M يتحدد طبقًا للحالة المشتركة للملفين ويسمى معامل الحث المتبادل، ووحدة قياسه الهنرى، ويرمز لها بالرمز (H) .

فى الشكل ٢ – ٥١ نفترض أن مساحة المقطع هي $A(m^2)$ وطول المسار المغناطيسي l (m) والنفاذيه μ(H/m). إذا كانت النفاذية μ ثابتة فإن الفيض المغناطيسي يتناسب مع التيار، ويمكن استخدام المعادلة (2-32) للحصول على المعادلة الآتية :

$$N_2 \phi = MI_1 \qquad (2 - 33)$$

وبناء على المعادلات (2-15) و (2-16) يمكن استنتاج مايلى :

$$\phi = BA = \mu HA = \frac{\mu N_1 I_1 A}{l} \quad (Wb) \qquad (2 - 34)$$

وهكذا فإن معامل الحث المتبادل M يمكن التعبير عنه بالمعادلة الآتية المستنتجة من المعادلات (2-33) و (2-34) .

$$L_1 = \frac{N_1 \phi_1}{I_1} \ (H) \ , \ M = \frac{N_2 \phi_1}{I_1} = \frac{N_2}{N_1} L_1 \ (H) \qquad (2-36)$$

عند مرور التيار $I_2(A)$ في الملف الثانوي S يتولد الفيض المغناطيسي $\phi_2(Wb)$ ونستنتج المعادلة الآتية .

$$L_2 = \frac{N_2 \phi_2}{I_2} \ (H) \ , \ M = \frac{N_1 \phi_2}{I_2} = \frac{N_1}{N_2} L_2 \ (H) \qquad (2-37)$$

ونتيجة لذلك يمكن استنتاج المعادلة التالية من المعادلات(2-36) , (2-37) .

$$M^2 = L_1 L_2$$

$$M = \sqrt{L_1 L_2} \qquad (2-38)$$

في الواقع تكون قيمة M أقل من تلك المعطاة في المعادلة (2-38) نتيجة لتسرب الفيض. أي إن الفيض المغناطيسي يتسرب من القلب الحديدي لكل من الملفين، ويمكن كتابة M فى هذه الحالة كما يلى :

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \qquad (2-39)$$

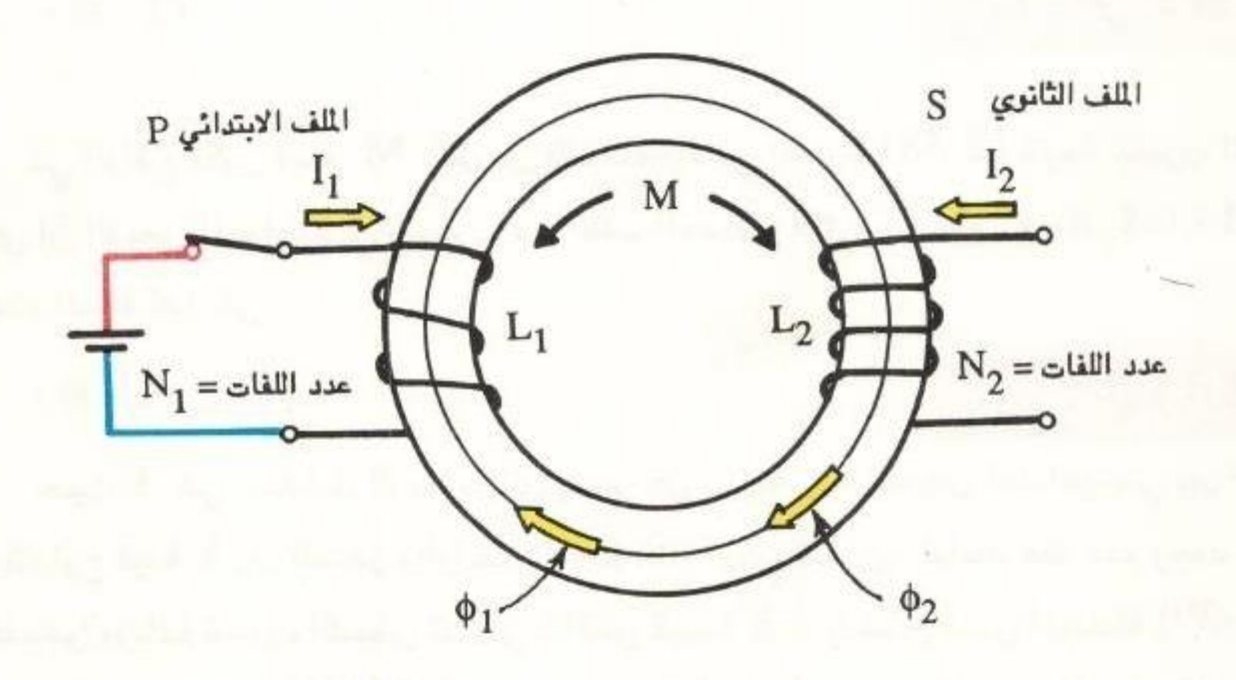
حيث k هي معامل الربط الذى يعبر عن درجة ربط الفيض المغناطيسي بين الملفين. وتتراوح قيمة k بين الصفر والواحد $(0 < k \leq 1)$ وهي تساوي الواحد عند عدم وجود تسرب للفيض وزيادة تسرب الفيض تعنى تناقص قيمة k . يتضح من المعادلة (2-39) أن معامل الحث المتبادل M (H) يتناسب مع قيمة k عند ثبات قيمة كل من $L_2(H), L_1(H)$.

سؤال ١٦

في الشكل ٢ – ٥١ عـدد لفـات الملـف الابتـدائى 100 وعدد لفات الملف الثـانوي 1000 . عند مرور تيار قيمته 5 أمبير في الملف الابتدائى حـدث فيض مغناطيسى قيمته 5×10^{-3} ويـبر . احسب معامل الحث المتبادل .

٢ – ٦ – ٤ معامل الحث الذاتي ومعامل الحث المتبـادل

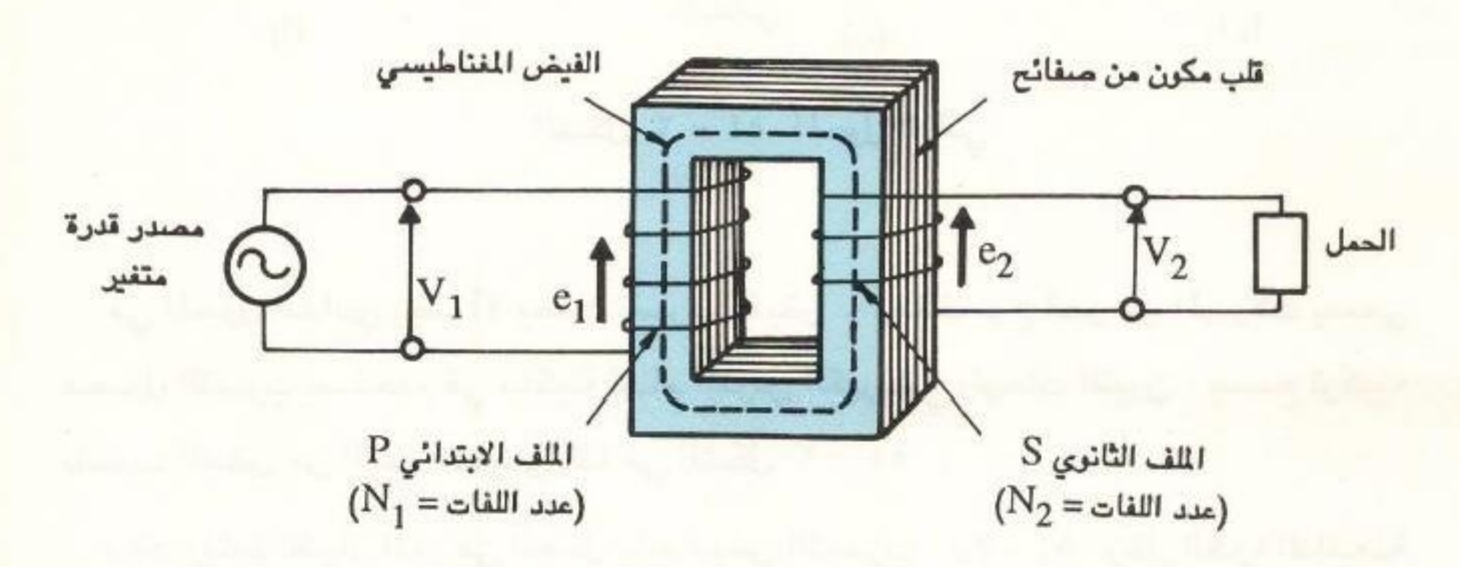
فى الشكل ٢ – ٥٢ نفترض أن معامل الحث الذاتي للملف الابتدائي P هــو L_1 (H) ومعـامل الحث الذاتي للمـلف الثـانوي S هـو L_2 (H) ومعـامل الحث المتبادل بين الملفين هو M(H) . عند مــرور التـيــار I_1 (A) في الملف الابتـدائي P يتــولــد فــيض مغناطيـــسي ϕ_1(Wb) ويمكن استنتاج مايـلي من المعـادلات (2-27) ، (2-35) .



الشكل ٢ – ٥٢ معامل الربط

٢ – ٦ – ٥ مبدأ عمل المحـول (الترانسفورمر) Transformer

المحـــول هو جهــاز لتغيير قيمـــة التيـار المتغـــير أو الجهـد المتغير ، ويبين الشكل ٢–٥٣ أن المحـول يتكون من ملفين S , P ملفـوفين حـول قلب مكون من صـفائح لهـا شـكل الهـيكل الخارجى للمحول . يتصل الملف P بمصدر التيار المتغير وهو الملف الابتدائي ويتصل الملف S بالحمل وهو الملف الثانوي .

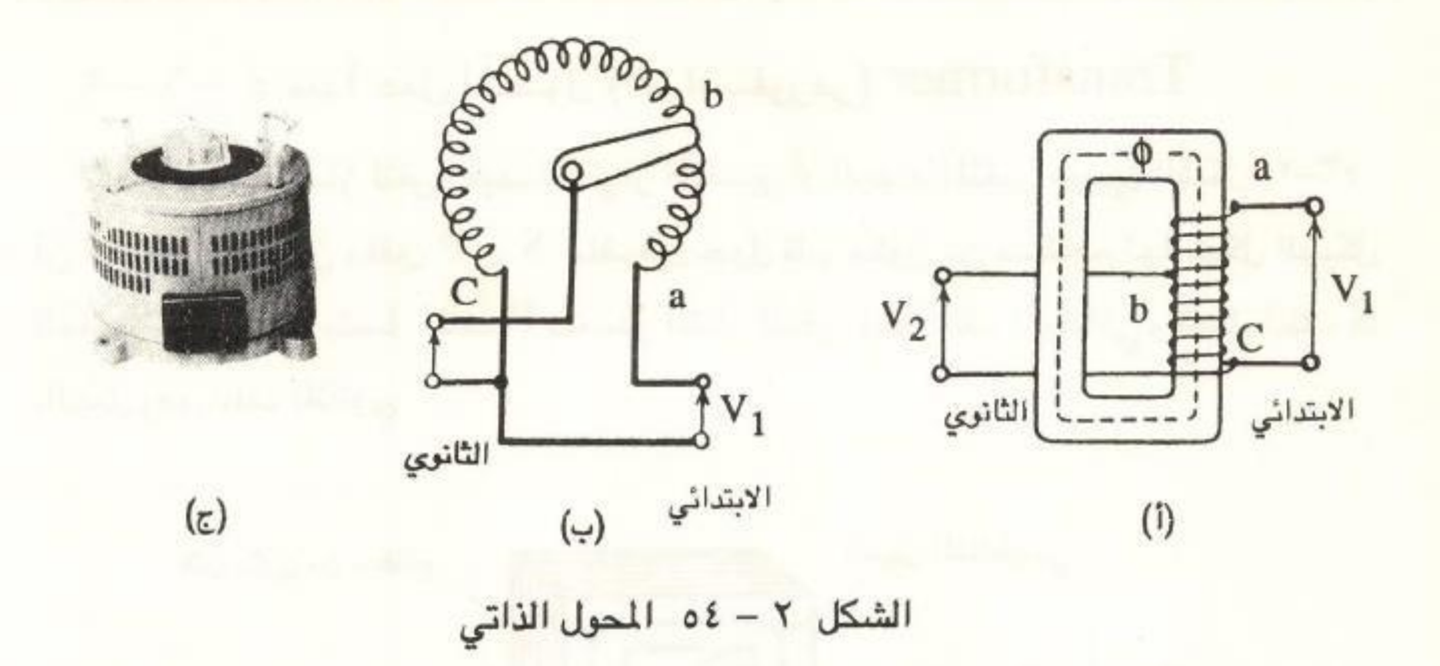


الشكل رقم ٢ – ٥٣ مـبدأ عمل المحـول

أ – المحــول الذاتى ومحول التسرب

Autotransformer and leakage transformer

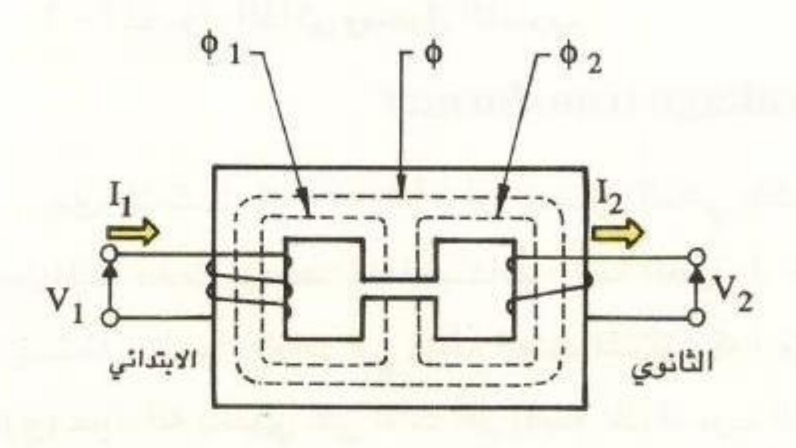
يبين الشكـــل ٢ – ٥٤ (أ) أن المحــول الذاتي يتكــون من ملف مفــرد . الجزء (a c) من الملف يعمل بوصـفـه ملفًا ابتـدائيًا، أمـا الجزء (b c) فـيعمل بوصـفه ملفًـا ثانويًـا . ويستخدم المحول الذاتى في منظم الجهد المنزلق كما في الشكل ٢ – ٥٤ (ب) والشكل ٢–٥٤ (ج) حيث إنه يحتوي على لفات أقل وقيمة أقل لتسرب الفيض وكفـاءة أفضل .



الشكل ٢ – ٥٤ المحول الذاتي

في المحول العادي يجب ألا يحدث تسرب للفيض . وهناك نوع آخر من المحولات يسمى محـول التسرب يستخدم في ماكينة لحام القوس الكهربائي ولوحات النيون ، يسمح تركيبه بتسرب الفيض من القلب الحديدي كما في الشكل ٢ – ٥٥ .

وعند زيادة التيار المار في الحمل يزيد فيض التسرب ϕ_2 , ϕ_1 وتقل القوة الدافعة الكهربية الحثية المتولدة في الملف الثانوى ويقل الجهد على الملف الثانوى V_2 (V) مما ينتج عنه ثبات قيمة التيار الثانوى I_2 (A) . وهكذا فإن هذا المحول يسمى محول التيار الثابت .





الشكل ٢ – ٥٥ محول التسرب

عند توصيل التيار المتغير الى الملف الابتدائي يمر التيار المتغير مع وجود تموجات مستمرة . ولهذا يتغير الفيض المغناطيسي ϕ في القلب الحديدي، وتتولد قوة دافعة كهربائية في الملفات P , S عن طريق الحث الكهرومغناطيسى . إذا كان عدد لفات الملف الإبتدائى N_1 وعدد لفات الملف الثانوى N_2 فإن القوى الدافعة الكهربائية المتولدة بالحث $e_1(V)$ $e_2(V)$ تكون كما يلى :

$$e_1 = -N_1 \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (V) \quad , \qquad e_2 = -N_2 \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (V) \qquad (2-40)$$

لنفترض أن الجهد الطرفي للملف الابتدائي $V_1(V)$ والجهد الطرفي للملف الثانوي $V_2(V)$ وكان :

$$e_1 \approx V_1 \ , \quad e_2 \approx V_2$$

نحصل على العلاقة الآتية :

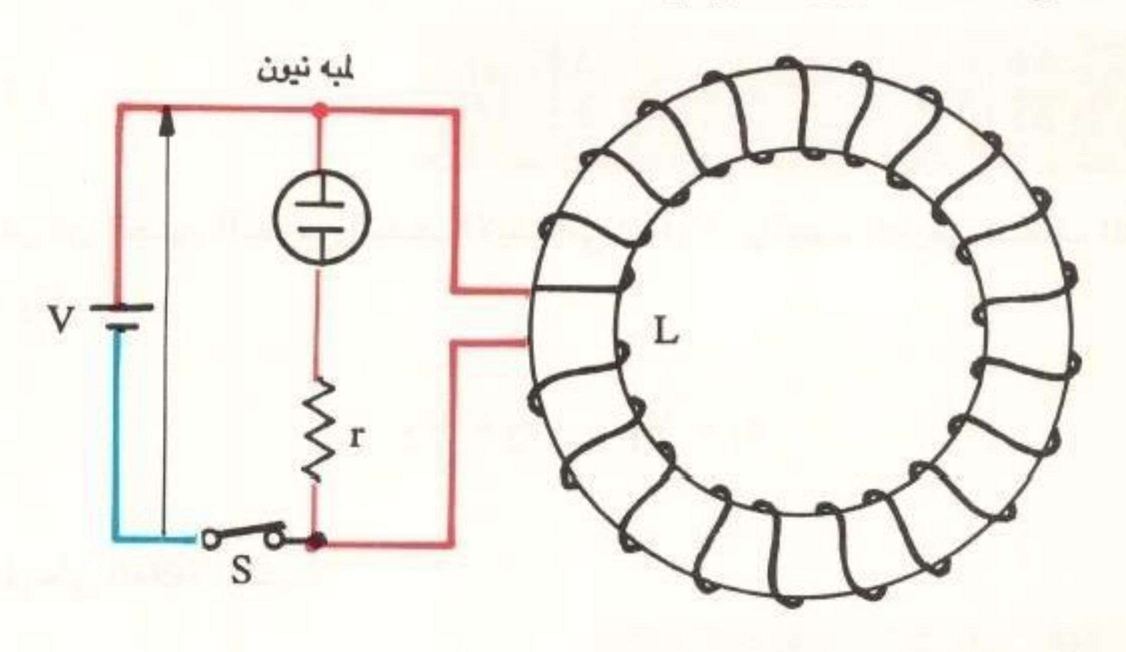
$$\frac{V_1}{V_2} \approx \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \qquad (2-41)$$

فى المعادلة (2-41) القيمة (a) هي نسبة لفات المحول ، والاختيار المناسب لهذه القيمة يتيح إمكانية تغيير قيمة التيار بحرية .

وحاليًا يتم توليد وإرسال وتوزيع القدرة الكهربائية في العالم في معظم الأحيان باستخدام التيار المتغير ، ويرجع ذلك إلى أن المحول يمكنه رفع وخفض الجهد بسهوله . ودور المحرك دور مهم ، وتستخدم المحولات على نطاق واسع ابتداء من المحولات ذات السعة الكبيرة لمعالجة القدرة في محطات توليد الكهرباء والمحطات الفرعية وانتهاء بالمحولات ذات السعة الصغيرة للأجهزة الإلكترونية المنزلية والأدوات الإلكترونية المختلفة وأدوات القياسات .

٢ – ٦ – ٦ الطاقة المخزنـة في ملف Energy stored in coil

يبين الشكل ٢ – ٥٦ أن اللمبة النيـون لاتضيء إذا كان المفتاح S مغلقًا مع وجود مصدر قدرة له جهد صغير V (V) ولكنها تضيء عند لحظة فتح المفتاح S. ويرجع ذلك إلى أنه عند لحظة فتح المفتاح S تقوم الطاقة الكبيرة المخزنة في الملف L بالتفريغ لحظيًا. الطاقة المخزنة في ملف تسمى الطاقة الكهرومغناطيسية .



الشكل ٢ – ٥٦ الطاقة الكهرومغناطيسيـة

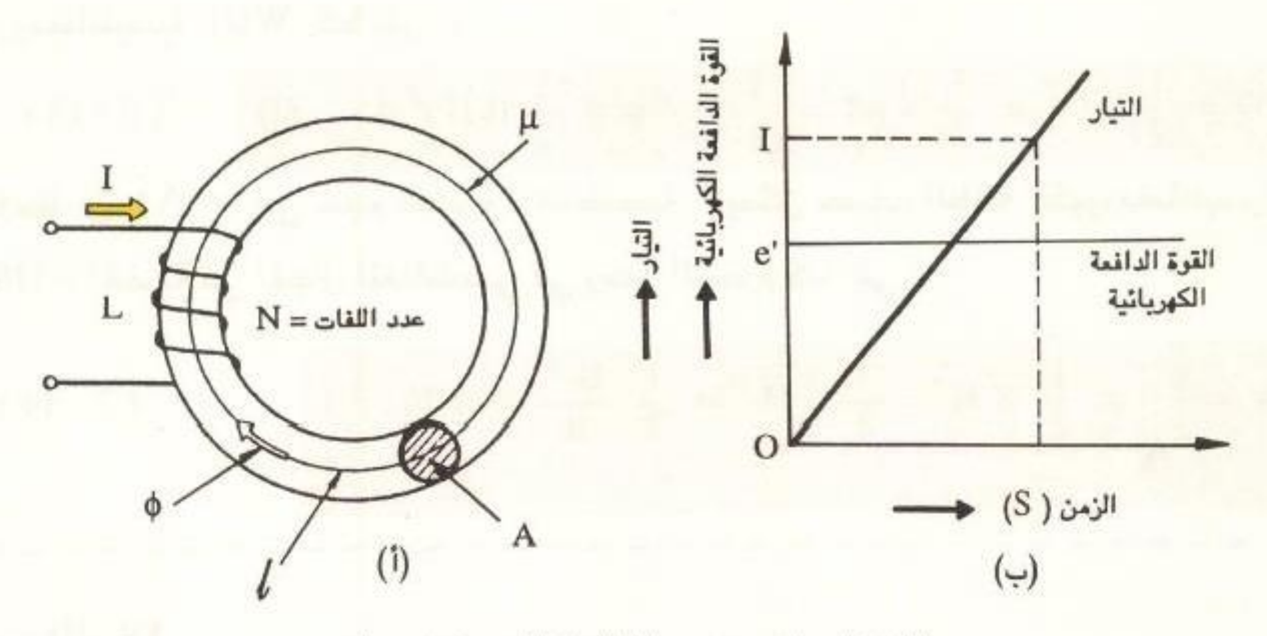
في الشكـل ٢ – ٥٧ (أ) نفترض أن التيار المار في ملف له معامـل حث ذاتي L (H) يزيد بصورة خطيـة مع الزمن كما في الشكـل ٢ – ٥٧ (ب) فيصل إلى القيمـة I (A) بعـد زمن قـدرة t (S) . تكون قـيمـة القـوة الدافـعـة الكهـربائيـة é (V) في الملف المستنتجـة من المعادلة (2-24) كما يلي :

$$é = |e| = L\,\frac{\Delta I}{\Delta t} = L\,\frac{I}{t} \quad (V)$$

نفـتـرض أن تيـــار الملف الابتـدائى p هو $I_1(A)$ وتيـار الملف الثـانوي S هو $I_2(A)$ نحصل على العلاقة :

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

القيمة $(1 / a)$ هى نسبة تحويل التيار لهذا المحول .



الشكل ٢ – ٥٧ الطاقة المخزنة في ملف

نفترض أن متوسط قيمة التيار هي $I/2$ [A] فيمكن حســاب الطاقة الكـهرومغناطيسية W (J) الخارجة من مصدر القدرة خلال زمن t (s) كما يلى :

$$W = \acute{e}\,\frac{I}{2}\,t = L\,\frac{I}{t}\cdot\frac{It}{2} = \frac{1}{2}\,L I^2 \quad (J) \qquad (2-42)$$

تستخدم هذه الطاقة لتوليد المجال المغناطيسي H (A / m) وتخزن في الملف .

لنفترض أن ملفًا عدد لفاته N لفـة، يدخل في دائرة مغناطيسية طول المسار المغناطيسي

لها ℓ (m) ومساحة مقطع المسار المغناطيسي $A(m^2)$ والنفاذية μ (H/m) . عند مرور التيار I (A) يتولد فيض مغناطيسى Φ (Wb) ويمكن من المعادلات (2-10) ، (2-25) استنتاج ما يلى :

$$NI = H\ell,\ LI = N\Phi,\ B = \Phi / A \quad (T)$$

عند تعويض هذه المعادلات في المعادلة (2-42) يمكن حساب قيمة الطاقة الكهرومغناطيسية W(J) كما يلى :

$$W = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} N \phi I = \frac{1}{2} H \ell \phi = \frac{1}{2} B H \ell A \quad (J) \qquad (2-43)$$

يلاحظ أن (ℓA) هى حجم الدائرة المغناطيسية ، ويمكن حساب الطاقة الكهرومغناطيسية w (J/m^3) المخزنة في المجال المغناطيسي في وحدة الحجوم كما يلي :

$$w = \frac{W}{\ell A} = \frac{1}{2} B H = \frac{1}{2} \mu H^2 = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} \quad (J/m^3) \qquad (2-44)$$

سؤال ١٧

يمر تيار قيمته 2 أمبير في ملف معامل الحث الذاتى له 500 ميللي هنري . إحسب الطاقة الكهرومغناطيسية المخزنة في الملف .

سؤال ١٨

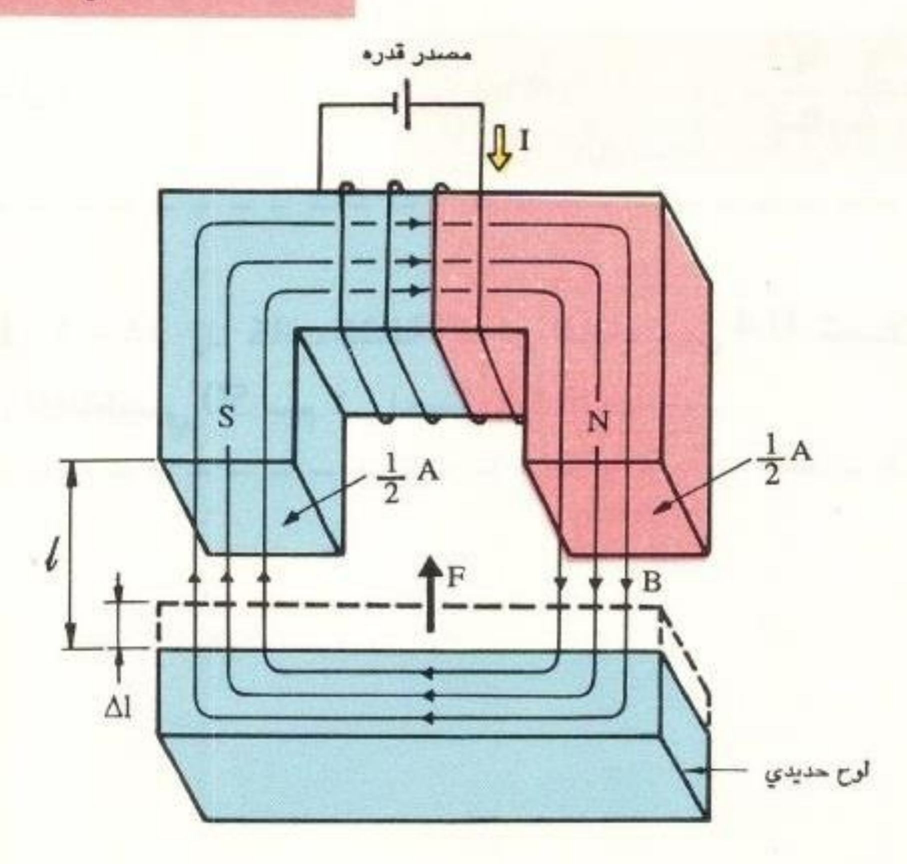
فى الشكل ٢ – ٥٧ إذا كانت كثافة الفيض المغناطيسي 0.4 تسلا والنفاذية النسبية 500 . احسب الطاقة الكهرومغناطيسية المخزنة في 1 م٣ .

٢ – ٦ – ٧ قوه الجذب المغناطيسى Magnetic attraction

كما في الشكل ٢ – ٥٨ يمكن حساب القوة التى تؤثـر على لوح حديدى موضوع بالقرب من مـغناطيس، والتي تجـعل اللوح ينجـذب إلى المغناطيس على أسـاس نظرية الطاقـة الكهرومغناطيسية .

في الشكل ٢ – ٥٨ نفترض أن مساحة الفيض المغناطيسي المار هي $A(m^2)$ وكثافة الفيض المغناطيسي $B\ (T)$ والمسافة بين المغناطيس واللوح الحديدى $\ell\ (m)$ ونفاذية الهواء $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}\ (H/m)$. فإن الطاقة الكهرومغناطيسية المخزنة في المجال المغناطيسي يمكن حسابها من المعادلة .

$$W = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_o} A\ell \ (J) \qquad (2-45)$$



الشكل ٢ – ٥٨ التجاذب المغناطيسى

نفترض أن اللوح الحديدي يتحرك مسافة $\Delta\ell$ (m) نتيجة لقوة التجاذب F (N) فإن الطاقة المفقودة في المجال المغناطيسي لمسافة $\Delta\ell$ (m) هى :

$$\Delta W = \frac{B^2}{2\mu_o} A \Delta\ell \quad (J)$$

وهذه تساوي قيمة الشغل $F\Delta\ell$ (J) المؤدى بواسطة قوة التجاذب . ولهذا فإن قوة التجاذب F(N) يمكن حسابها كما يلي :

$$F \Delta\ell = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_o} A \Delta\ell$$

$$F = \frac{1}{2} \frac{1}{\mu_o} B^2 A \quad (N) \qquad (2-46)$$

أما قوة التجاذب $f(N/m^2)$ المؤثرة على وحدة المساحة فتحسب كما يلي :

$$f = \frac{F}{A} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_o} \quad (N/m^2) \qquad (2-47)$$

سؤال ١٩

في الشكل ٢ – ٥٨ إذا كانت كثافة الفيض المغناطيسي 0.4 تسلا ، ومساحة توليد الفيض المغناطيسي 50 سم ٢. احسب قوة التجاذب .

تمـــــارين

١ - إذا كانت قوة التجـاذب بين قطبين مغناطيسيين البعد بينهما 10 سم هي 5 نيوتن وكانت شدة أحد القطبين 5×10^{-4} ويبر . احسب شدة القطب الآخـر .

٢ - نفترض قياس شدة المجال المغناطيسي عند نقطة تبعد 30سم من سلك خطي يمر به تيار وأن كثافة المجال المغناطيسي هي 5A/m . أحسب قيمة التيار .

٣ - يمر تيار قيمته 1 أمبير في ملف أسطواني نصف قطره 5 سم وعدد لفاته 10 ، احسب شدة المجال المغناطيسى عند مركز الملف .

٤ - ملف اسطـواني رفيـع عـدد لفاته 800 لفة / متر، وشـدة المجال المغناطيسي داخله 4000 أمبير / متر . احسب التيار المـار بالملف .

٥ - يمـر تيار قيمته 3 أمبير في ملف حلقـى متوسط نصف قطره 20 سم، والعدد الكلى للفاتـه 500 . احسب شـدة المجال المغناطيسي داخل الملف .

٦ - قلب حديدي له شكل الإطار مصنوع من صلب السـيليكـون, ومساحـة مقطعه 3 سم٢ ، وطول المسار المغناطيسي 40 سم . إحسب المقاومة المغناطيسية .

٧ - يمـر تيار قيمته 0.2 أمبير في الإتجاه نفسه في موصلين متوازيين موضوعين في الهواء والمسافة بينهما 10 سم . إحسب القوة المؤثرة على المتر الطولي من الموصل .

٨ - ملف عدد لفاته 80 ويتغير الفيض المغناطيسي الذي يتقاطع معه بمقدار 0.1 ويبر خـلال مدة زمنية 0.2 ثانية . احسب قيمة القوة الكهرومغناطيسيـة المتولدة في الملف .

٩ - دائرة مغناطيسية مساحة مقطع المسار المغناطيسي بها2 سم٢ ، وطول المسـار المغناطيسى 36 سم ، وعدد لفات الملف 1200 لفة ، ومعامـل الحث الذاتى 1 ميللى هنري . احسب النفاذية النسبية لهذه الدائرة المغناطيسية .

١٠ – محول عدد لفات الملف الابتدائي به 100 لفة ، وعدد لفات الملف الثانوى 200 لفة ومعامل الحث المتبادل 100 ميللى هنري . احسب معامل الحث المتبادل إذا أصبح عدد اللفات في الملفات 300 ، 500 .

١١ – إذا كان معامل الحث الذاتي للملف الابتدائي 30 ميللى هنري ومعامل الحث الذاتى للملف الثانوى 240 ميللى هنري ومعامل الربط k هو 0.1 . احسب معامل الحث المتبادل .

١٢ – إذا زادت قيمة التيار المار في ملف إلى ثلاثة أضعافه ، فكم مرة تزيد الطاقة الكهرومغناطيسية المخزنة فيه ؟

الفصل الثالث

الكهرباء الساكنــة

Static electricity

عند دلك جسم مـا تتـولد الكهرباء، وتلك ظاهـرة معـروفة جداً. هذا النوع من الكهـرباء له شحنـة كهربائيـة تستقر على سطح الجسم وتسمى الكهرباء الساكنة .

وعند توصيل قطبي بطاريـة إلى لوحين معدنيين يواجه أحدهما الآخر وبينهما عـازل فإن الشحنة الكهربائية المخزنة عليهما تتناسب مع جهد البطارية . ويسمى هذا التركيب بالمكثف ويستخدم في أجهزة الحاسب الآلي وأجهزة كهربائية أخرى .

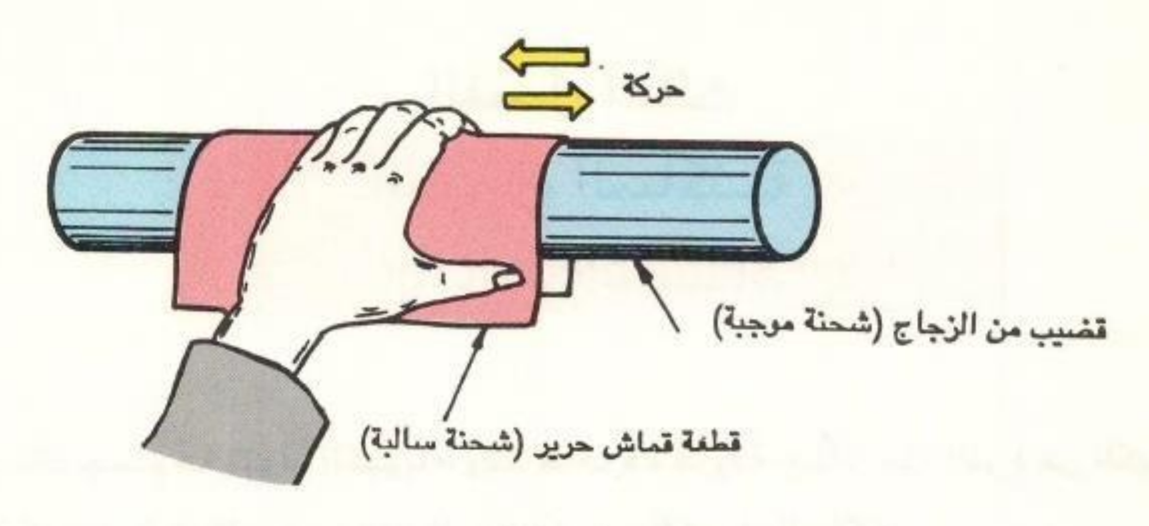
في الفصل الأول تمت معالجة حركة الشحنة أو التيـار، وعلى النقيض من ذلك ففي هذا الفصل ستتم معالجة الشحنة المخزنة والشحنـة غير المتحركة عن طريق علاقتها بالمكثف والتفريغ .

الموضوعات المعالجة في هذا الفصل لها علاقة قريبـة بالمغناطيسيـة التى تمت دراستها في الفصـل الثانى ، وإن دراسـة الاخـتـلافـات بين هذين الفصـلين سـوف تسـاعدك لفـهم هذا الفصل .

٣ – ١ كهرباء الاحتكاك Frictional electricity وقانون كولوم

٣ – ١ – ١ التكهــرب Electrification

كما هو مبين بالشكل ٣ – ١ ، عندما يـدلك قضيب من الزجـاج بقطعة قماش من الحرير ، فإن كـل من المادتين يحـدث بها كهرباء تجذب رقائق الورق.



الشكل ٣ – ١ التكهــرب

تسمى ظاهرة حدوث الكهرباء بدلك الجسم « التكهرب» ويسمى الجسم المتكهرب بالجسم المشحون . وتخزن الكهرباء في الجسم المشحون المعزول ، أي إن الشحنة الكهربائية لاتتحرك . وتسمى الكهرباء غير المتحركة « بالكهرباء الساكنــة ».

يسبب دلك جسمين مختلفين شحنة موجبة في أحد الجسمين وشحنة سالبة في الآخر . هذه الحقائق تشير إلى أن الشحنة الكهربائية نوعان ، شحنات موجبة وأخرى سالبة .

والشحنات التي لها الإشارة نفسها تتنافر، والمختلفة الإشارة تتجاذب . وتسمى القوة المؤثرة بين الشحنات بقوة الكهرباء الساكنــة .

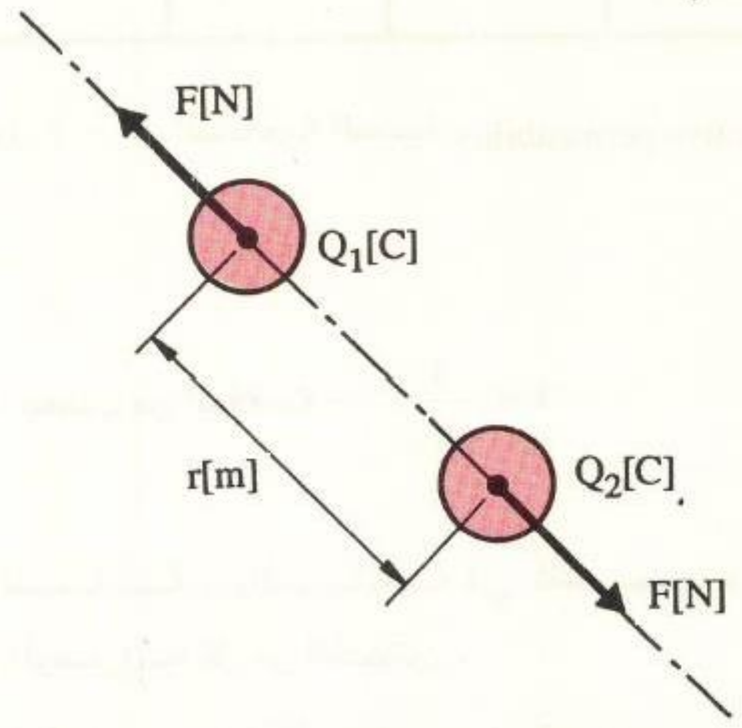
٣ – ١ – ٢ قانون كــولوم

كما هو مبين بالشكل ٣ – ٢ ، عند وضع شحنتين Q_1 كولوم و Q_2 كولوم على مسافة r (متر) ، فإن مقدار قوة الكهرباء الساكنة F (نيوتن) المؤثرة بينهما يمكن التعبير عنها بالمعادلة الآتية :

$$F = k\frac{Q_1 Q_2}{r^2} \text{ (N)} \qquad (3\text{-}1)$$

واتجاهها يكون على خط مستقيم يمر بكل من الشحنتين .

ولهذا فإنه من المعروف أن قوة الكهرباء الساكنة بين شحنتين تتناسب طرديًا مع حاصل ضرب الشحنتين ، وعكسيًا مع مربع المسافة بينهما . وتعرف هذه العلاقة بقانون كولوم الخاص بالكهرباء الساكنة . عندما يعبر عن الشحنة (كولوم) بالموجب للشحنة الموجبة وبالسالب للشحنة السالبة ، فإن قوة الكهرباء الساكنة تكون تنافرية في الحالة الموجبة، وتكون تجاذبية في الحالة السالبة .



الشكل ٣ – ٢ قانون كولوم الخاص بالكهرباء الساكنة

الدلك الحر لمادتين من السلسلة التالية يحدث تكهربًا موجبًا في المادة الأسبق في السلسلة وسالبا في المتأخرة . تسمى هذه السلسلة بسلسلة الكهرباء الاحتكاكية : الفرو ، الصوف، السيراميك ، الشمع الأحمر ، الزجاج ، الورق ، الحرير ، الكهرمان، المعدن ، الصمغ ، الكبريت ، السيليولويد .

المادة	$\in_r$	المادة	$\in_r$	المادة	$\in_r$
البرافين	2.1 - 2.5	الفخار	5.7 - 6.8	راتينج فينولي	4.5 - 5.5
الزجاج	5.4 - 9.9	السيراميك	2.9 - 3.7	الماء	81
الميكا	2.5 - 6.6	الايبونيت	2.8	أكسيد التيتانيوم	83 - 183
الورق	2.0 - 2.6	السلنيوم	6.1 - 7.4		

الجدول ٣ – ١ السماحية النسبية Relative permeability $\in_r$

ثابت التناسب k يحسب من العلاقة : $k = \dfrac{1}{4\pi\in}$

$\in$ ترمز إلى السماحية ، والسماحية هي ثابت يحدد بواسطة وسط (العازل الكهربائي)* الفراغ الموضوع فيه كل من الشحنتين .

نفترض أن سماحية الفراغ هى $\in_0$ ** فتكون سماحية وسط عام هي $\in = \in_0 \in_r$

و تسمى $\in_r$ بالسماحية النسبية ، ويبين الجدول ٣ – ١ السماحية النسبية .

وتتحول العلاقة (1 - 3) إلى العلاقة التالية بالنسبة للفراغ والهواء :

$$F = \frac{1}{4\pi\in_0}\frac{Q_1Q_2}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{Q_1Q_2}{r^2} \text{ (N)} \tag{3-2}$$

مثال ١

بفرض أن شحنتين موجبة وسالبة قيمتهما 3×10^{-6} كولوم موضوعتان على مسافة 5 سم في الفراغ . احسب قوة الكهرباء الساكنة المؤثرة بينهما .

الحل:

عوض عن $Q_1 = 3x10^{-6}C$ و $Q_2 = -3x10^{-6}C$ و $r = 0.05\ m$

في العلاقة (3-2) تحصل على :

$$F = -9 \times 10^{9} \times \frac{3x10^{-6} x 3x10^{-6}}{0.05^{2}} = \frac{-81x10^{-3}}{2.5 \times 10^{-3}} = -32.4N$$

سؤال ١

على فرض أن شحنتين قيمتهما $Q_1 = 1x10^{-6}C$ و $Q_2 = 5x10^{-6}C$ وضعتا في الفراغ، والمسافة بينهما 10 سم . احسب القوة المؤثرة بينهما .

٣ – ٢ المجال الكهربائي وخطوط القوى الكهربائية

٣ – ٢ – ١ حث الكهرباء الساكنة وحجب الكهرباء الساكنة

لقد وجدت في الكهرباء الساكنة الظاهرة نفسها التي وجدت في الحث المغناطيسي المعالج في الفصل الثاني .

اذ أنه كما هو مبين بالشكل ٣ – ٣ ، عندما يحرك موصل A مكهرب بشحنة موجبة في إتجاه موصل B معزول ، فإنه يحدث شحنة سالبة في الموصل B فى الجزء القريب من الموصل A و شحنة موجبة في الجزء البعيد من الموصل A . وتحدث هذه الظاهرة بتحرك

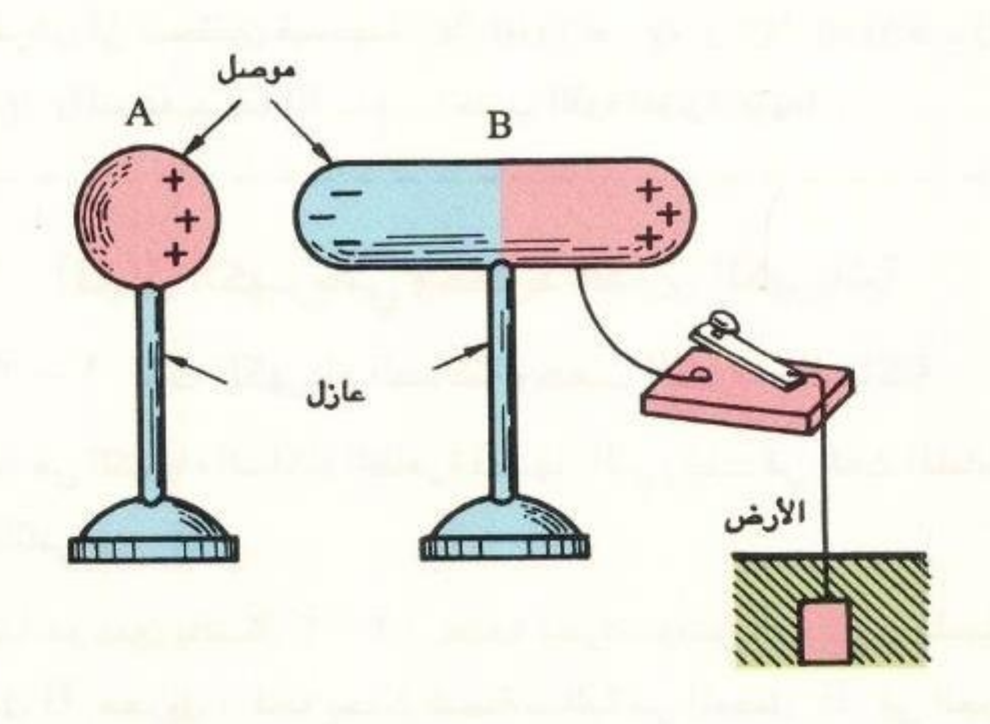
الشحنات الموجبة والسالبة الموزعة بانتظام في الموصل B إلى نهايات الموصل B تحت تأثير التجاذب وتتنافر مع شحنة الموصل A .

* على الرغم من أن هذه المادة عازلة ولاتمرر التيار الكهربائي ، فهي تولد وتخزن الشحنة الكهربائية، ومن هنا سميت العازل الكهربائي .

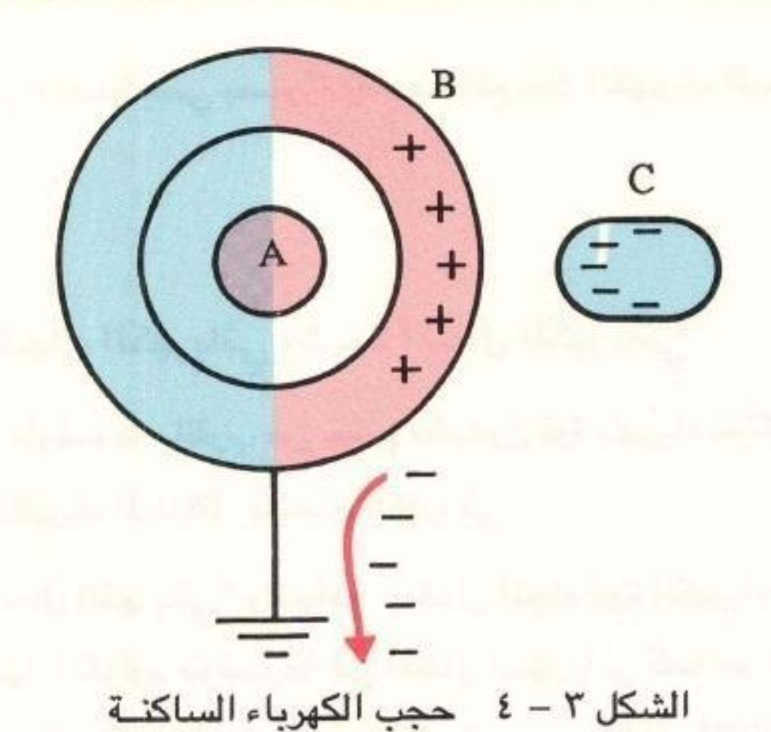
** سماحية الفراغ $\in_0$. تعطى بالقيمة $\in_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

وبالتفصيل $8.85487817 \times 10^{-12}$ F/m ونظرياً، تعطى $\in_0$ بالعلاقة $10^7/4\pi C^2$ ، حيث C هي سرعة الضوء في الفراغ . و تكون $\in_r = 1$ في الفراغ وتقريبا 1 في الهواء .

وسوف ندرس الوحدة الفاراد (F) فيما بعد .



الشكل ٣ – ٣ حث الكهرباء الساكنة



الشكل ٣ – ٤ حجب الكهرباء الساكنـة

تسمى هذه الظاهرة حث الكهرباء الساكنـة . وعندما يحـرك الجسم المشحـون A بعيداً عن الموصل B ، فان B يعود إلى حالة عدم التكهرب .

وعندمـا يوصل الموصـل B إلى الأرض بواسطة سلك توصـيل (هـذه العـمليـة تسـمى بالتأريض) كما بالشكل ٣ – ٣ ، فإن الشحنـة السالبة الموجودة في الموصل B تبقى تحت تأثير جذب الشحنـة الموجبة على الموصل A بينما تهرب الشحنـة الموجبـة على الموصل B إلى الأرض خـلال السلك . وهنا ، عندما يزال السلك ويحرك الجسم المشحـون A بعيداً فإن الشحنة السالبة فقط تبقى على الموصل B وتـوزع بانتظـام .

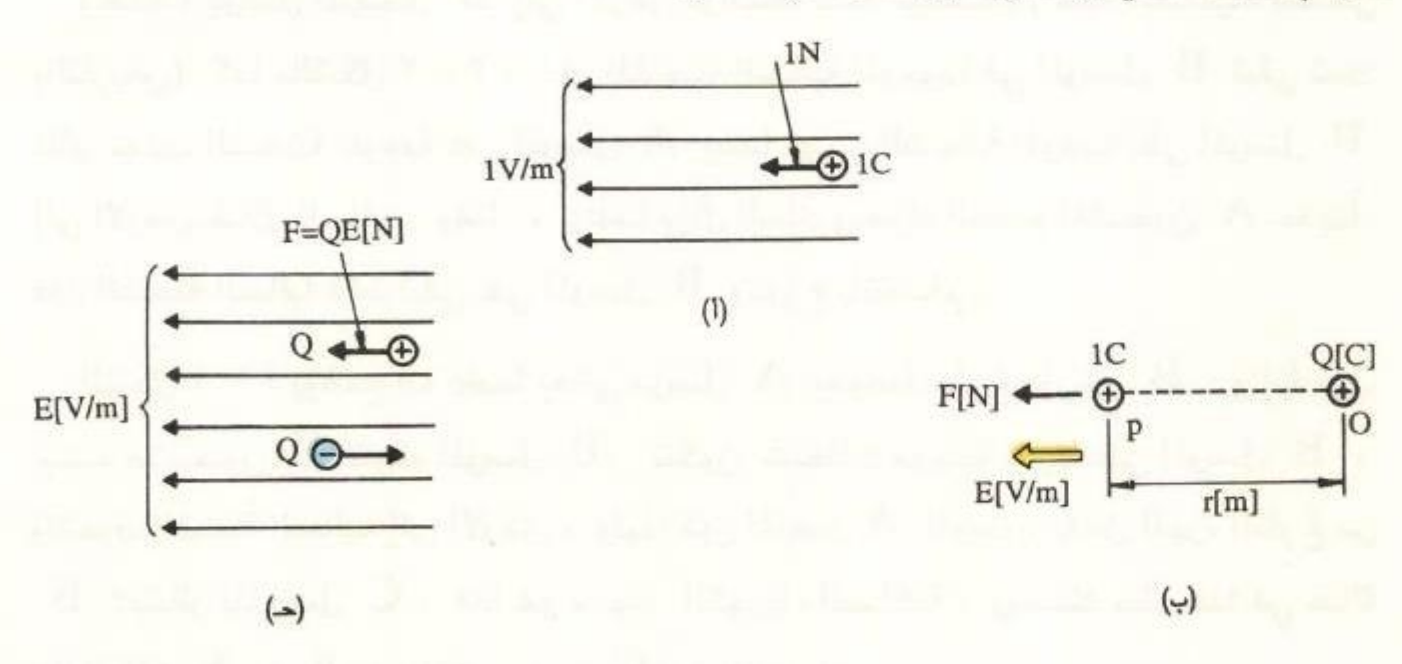
الشكل ٣ – ٤ يوضح أنه عندما يغطى موصل A بموصل فارغ مؤرض B ؛ و إذا قرب جسم مشحـون C تجاه الموصل B، تتكون شحنات موجبة تتـرك على الموصل B ، وتتحرك الشحنة السالبة إلى الأرض ، ولهذا فإن الموصل A الموجـود داخل الجزء الفارغ من B لايتـأثر بالموصل C . هذا هو حـجب الكهرباء السـاكنة ، ويحـدث مثل هذا في حـالة ماإذا كان A هو الجسم المشحون و C هـو الموصـل .

يستخدم الحجب المغناطيسي بصورة واسعة لمنع حث الكهرباء الساكنة على الأجهزة الإلكترونية .

٣ – ٢ – ٢ المجال الكهربائي وشدة المجال الكهربائي

تستقبل الشحنة الموضوعة بالقرب من جسم مشحون قوة كهرباء ساكنة ، ويسمى الفراغ الذى تؤثر فيه قوة الكهرباء الساكنة بالمجال الكهربائي .

يعبر عن شدة المجال الكهربائي* واتجاهه بمقدار اتجاه قوة الكهرباء الساكنة المؤثرة على شحنة موجبة قيمتها 1 كولوم موضوعة في المجال الكهربائى كما هو مبين بالشكل ٣ – ٥ (أ). ووحدة شدة المجال الكهربائى هى ڤولت لكل متر، ويرمز لها v/m في مجال كهربائي شدته 1 ڤولت / م ، وقوة كهربائية ساكنة قيمتها 1 نيوتن تؤثر على شحنة موجبة قيمتها 1 كولوم . يتضح من الشكل ٣ – ٥ (ب) ، وبفرض أن الشحنات الكهربائية Q(C) و 1(C) وضعت على مسافة r(m) من بعضهما فان القوة F (نيوتن) المؤثرة بينهما يعبر عنها بالعلاقة التالية والناتجة من العلاقة (2 - 3) :



الشكل ٣ – ٥ شدة المجال الكهربائى

* شدة المجال الكهربائى هو متجه له مقدار واتجاه ، إلا إنه في هذا الكتاب نستخدم العبارة ، شدة المجال الكهربائى ، للتعبير ببساطة عن مقدار شدة المجال الكهربائى .

$$F=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\cdot\frac{Qx1}{r^2}=9x10^9\frac{Q}{r^2}\ (N) \qquad (3\text{-}3)$$

ولهذا فإن شدة المجال الكهربائى $E(V/m)$ المتولدة بواسطة الشحنة Q عند النقطة P تقدر بالعلاقة الآتية :

$$F=\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}=9x10^9\frac{Q}{r^2}\ (V/m) \qquad (3\text{-}4)$$

كما يتضح من الشكل ٣ - ٥ (جـ) ، بفرض أن الشحنة $Q(C)$ وضعت في مجال كهربائى شدته $E(v/m)$ ، فإن مقدار الكهرباء الساكنة $F(N)$ المؤثرة على الشحنة يعبر عنها بالعلاقة التالية:

$$F=QE\ (N) \qquad (3\text{-}5)$$

واتجاه القوة هو اتجاه المجال الكهربائي في حالة الشحنة الموجبة لـ Q وهي في عكس اتجاه المجال الكهربائي في حالة الشحنة السالبة .

وكما هو معروف من العلاقة (3-4) ، تختلف شدة المجال الكهربائى المتولد حول شحنة كهربائية على حسب المسافة من الشحنة ، وعلى النقيض فإن المجال الكهربائى الذى له شدة متساوية في كل مكان يسمى المجال الكهربائى المتجانس .

مثال ٢

افترض شحنة قيمتها 5×10^{-6} كولوم في الهواء . احسب شدة المجال الكهربائي عند نقطة على بعد 30 سم من الشحنة .

الحل

عوض عن $Q = 5x10^{-6}C$ كولوم و $r = 0.3m$ في العلاقة (3-4)

فتحصل على :

$$E=9x10^{9}x\frac{5x10^{-6}}{0.3^{2}}=\frac{45x10^{3}}{9x10^{-2}}=5x10^{5}V/m$$

السؤال ٢

احسب شدة المجال الكهربائي عند النقطة التى تؤثر عندها قوة مقدارها 0.05 نيوتن على شحنة قيمتها 0.1 كولوم .

٣ – ٢ –٣ خط القوة الكهربائية والفيض الكهربائى

في الفصل الثانى ، تم تقديم خط القوة المغناطيسية والفيض المغناطيسى كخطوط خيالية للتعبير عن حالة المجال المغناطيسى . وكذلك في المجال الكهربائي ، تستخدم خطوط خيالية ، هي خطوط القوي الكهربائية والفيض الكهربائي ، كما هو موضح في الشكل ٣– ٦ ، وخط القوة الكهربائية له الخواص التالية :

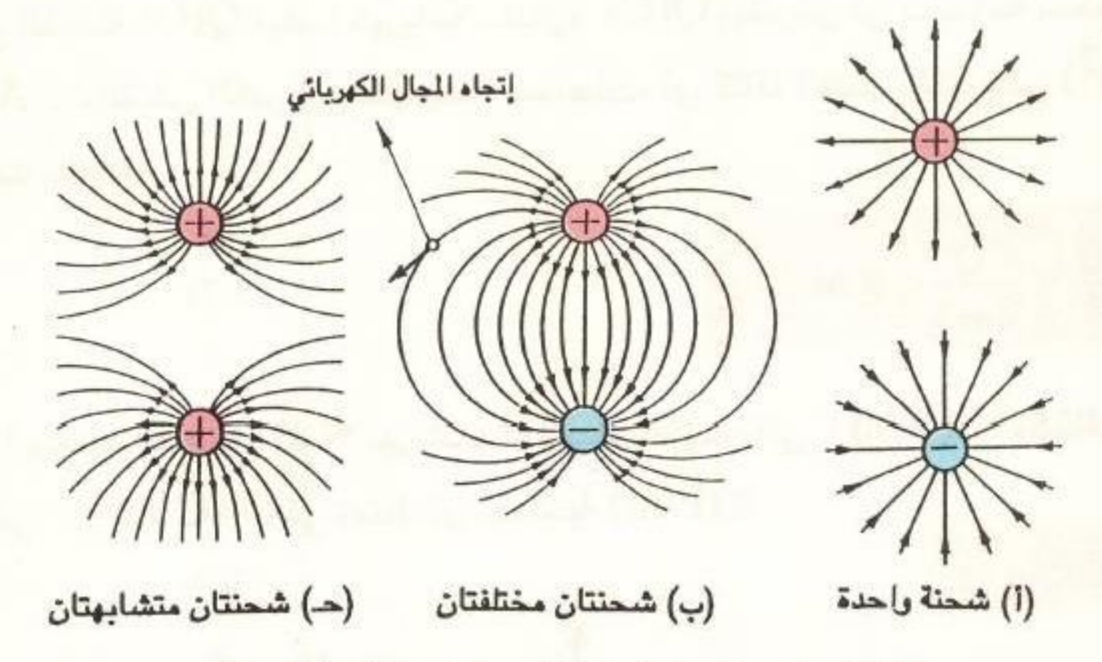
(١) يخرج خط القوة الكهربائية من الشحنة الموجبة، ويدخل في الشحنة السالبة .

(٢) خطوط القوى الكهربائية يكون عندها دائما ميل للانكماش، وهى متنافرة فيما بينها مثل أحبال الصمغ .

(٣) خطوط القوى الكهرباء لاتتقاطع مع بعضها .

(٤) اتجاه الخط المماس لخطوط القوة الكهربائية عند نقطة مختـارة بحرية يعبر عن اتجاه المجال الكهربائى عند هذه النقطة المعينة.

(٥) كثافة خطوط القوة الكهربائية في مستوى عمودى على المجال الكهربائى تعبر عن شدة المجال الكهربائى عند هذه النقطة .



(أ) شحنة واحدة (ب) شحنتان مختلفتان (حـ) شحنتان متشابهتان

الشكل ٣ – ٦ خطوط القوى الكهربائية وتوزيعها

(٦) وحدة الشحنة أى ± 1 كولوم تعطى وتستقبل $\frac{1}{\epsilon}$ من خطوط القوى الكهربائية

(٧) فى موصل بدون قوة تيار ، فإن خطوط القوى الكهربائيـة تخـرج وتـأتي في اتجـاه عمودي على سطح الموصل، ولاتوجد خطوط قوى كهربائية داخل الموصل .

والجدير بالذكر أن الشـحنات المتمـاثلة تعطي أعداداً مـخـتلفة من الخطوط على حـسب الوسط. فعلى سبيل المثال فإن شحنة قيمتها 1 كولوم تعطى خطوط قوى كهربائية عـددها $\frac{1}{\epsilon_0}$ في الفراغ، وتعطي $\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r}$ فــي وسط ذات سماحية نسبية ϵ_r. ولهذا فإن $\frac{1}{\epsilon_0}$ من خطوط القوى الكهربائية ينظر له كخط خيالي فردي أي فيض كهربائي وله وحدات كولوم (C) مثل وحدات الشحنة .

افترض شحنة Q (C) موجودة في مركز كرة نصف قطرها r(m) ، كما هو مبين بالشكل ٣ – ٧، وشدة المجال الكهربائي على سطح الكرة E(V/m) يعبر عنها بالعلاقة :

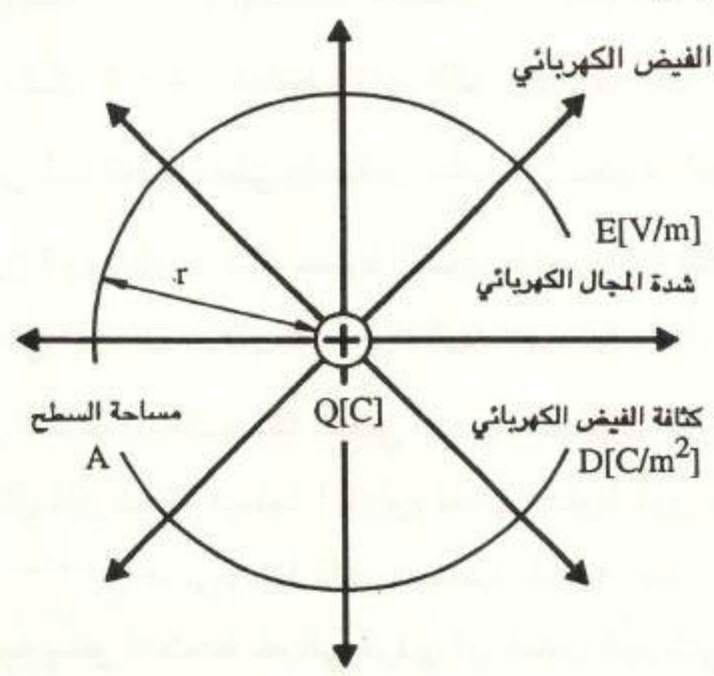
$$E = \frac{Q}{4\pi \in r^2} \text{ (V/m)} \qquad (3\text{-}6)$$

تشع الشحنة Q(C) فيضًا كهربائيًا مقداره Q(C) ونفترض أن مساحة سطح الكرة A (m^2) ، والفيض الكهربائى لكل وحدة مساحات، أى كثافة الفيض الكهربائى D(C/m^2) يعبر عنه بالعلاقة :

$$D = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{4\pi r^2} \text{ } (C/m^2) \qquad (3\text{-}7)$$

ولهذا وجدت العلاقة الآتية* بين شدة المجال الكهربائى E(V/m) وكثافة الفيض الكهربائي D (C/m^2) في وسط ذي سماحية (F/m) $\in$.

$$D = \in E (C/m^2) \qquad (3\text{-}8)$$



الشكل ٣ – ٧ شدة المجال الكهربائي وكثافة الفيض الكهربائي .

* شدة المجال الكهربائى $E(V/m)$ هي كثافة خطوط القوى الكهربائية . لهذا فإن العلاقة (8-3) تعني أن E هى النسبة بين كثافة الفيض الكهربائي وكثافة خطوط القوى الكهربائية . ولهذا فإن العلاقة تتفق مع تناظر كل من الفيض الكهربائى للشحنة Q و $\frac{Q}{\epsilon}$ من خطوط القوى الكهربائية .

٣ – ٢ – ٤ الجهد الكهربائي المطلق وفرق الجهد Potential difference

كما هو مبين بالشكل ٣ – ٨ ، نفترض أن قوة كهرباء ساكنة $F(N)$ تؤثر على شحنة موجبة قيمتها $1(C)$ موضوعة عند النقطة p_1 فى مجال كهربائي مولد عن طريق شحنه كهربائية مقدارها $Q(C)$ ، وحركة الشحنة إلى النقطة p_2 فى اتجاه معاكس لاتجاه القوة $F(N)$ يحتاج لإضافة قوة خارجية قيمتها $F(N)$ لعمل الشغل من الخارج .

F[N] P1 P2
+1C +Q[C]

الشكل ٣ – ٨ الجهد الكهربائي وفرق الجهد .

الشغل الخارجى المطلوب لتحريك شحنة كهربائية بين نقطتين في عكس اتجاه المجال الكهربائي هو فرق الجهد بين النقطتين . في المثال السابق ، النقطة p_2 لها جهد أعلى من النقطة p_1 * .

يستخدم الڤولت (V) بالنسبة لوحدات فرق الجهد.

ففرق الجهد الذى قيمته 1 ڤولت بين نقطتين معناه أنه يحتاج شغل قيمته 1 چول لتحريك

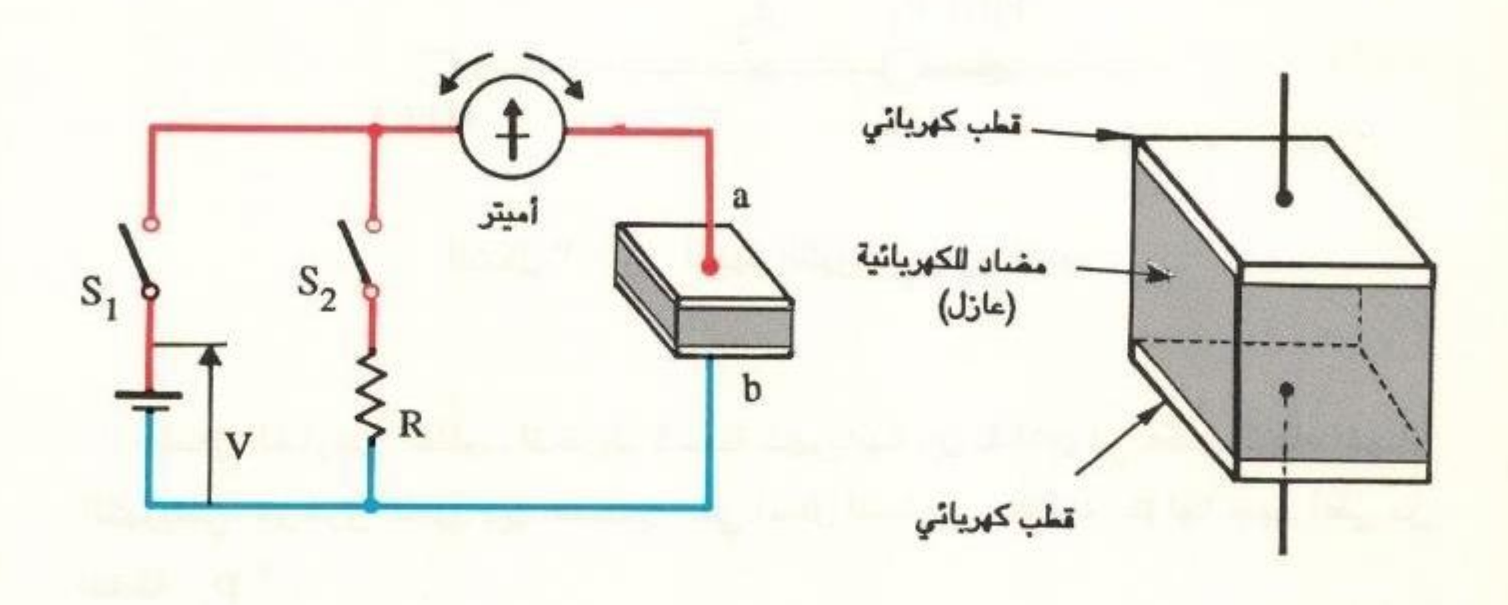
شحنة موجبة قيمتها 1 كولوم . ويعبر عن الجهد عند نقطة حرة في الفضاء بالفرق بين نقطة معينة عند مالا نهاية كأساس والنقطة الحرة . هذا الأساس هو عمليًا الجهد صفر باستخدام الأرض له ويستخدم الفولت كوحدة للجهد .

يستخدم ميل الجهد (التفاضل) لفرق الجهد لكل 1 م طول ، بوحدة فولت/م . لهذا فإن ميل الجهد يساوى شدة المجال الكهربائى .

٣ – ٣ المكثف والسعة الكهروستاتيكية Electrostatic capacity

٣ – ٣ – ١ المكثف Capacitor

يتركب المكثف من عازل كهربائى موضوع بين لوحين معدنيين كقطبين موضوعين بحيث يوازى كل منهما الآخر كما نرى في الشكل ٣ – ٩ .



الشكل ٣ – ١٠ شحن وتفريغ المكثف .

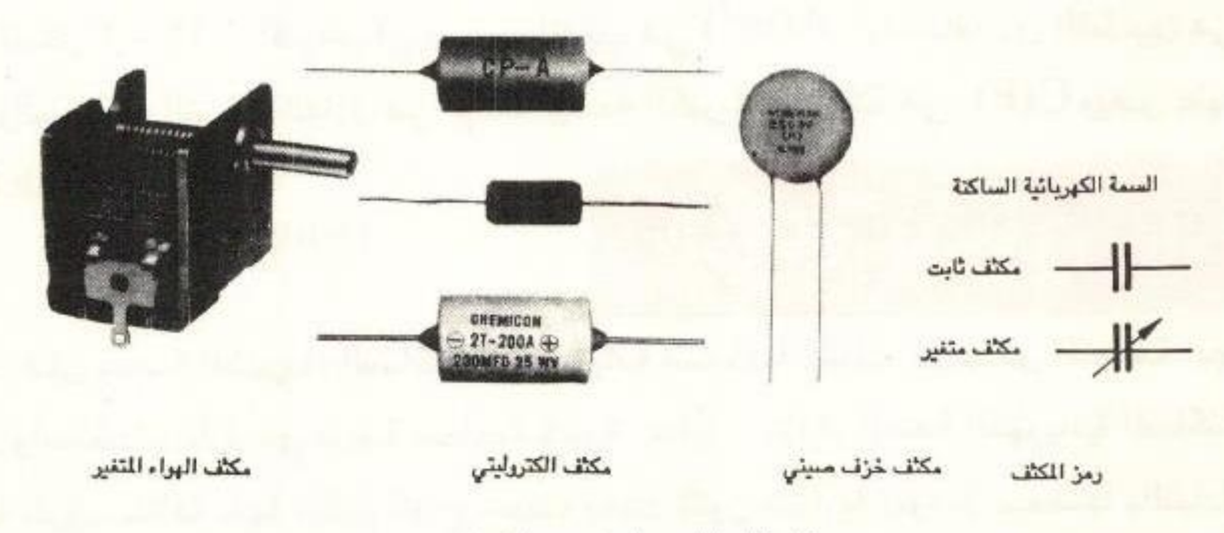
الشكل ٣ – ٩ المكثف .

*الجهد الكهربائى وفرق الجهد المعالج في الفصل الأول مماثلين لما نقوم بمعالجته في هذا الفصـــل .

في الشكل ٣ - ١٠ ، نفترض أننا سنقوم بوضع المفتاح S_1 في وضع التشغيل ونؤثر بجهد التيار المستمر الذى قيمته $V(V)$. من المتوقع أنه لن يسري تيار، وذلك لوجود العازل بين a b ، إلا أن تياراً يسري في لحظة تشغيل المفتاح ليتحرك مؤشر جهاز قياس التيار بعد ذلك ، عندما يوضع المفتاح S_1 في وضع التشغيل والمفتاح S_2 في وضع عدم التشغيل، يسري تيار في اتجاه معاكس في لحظة عدم تشغيل S_2 . نتيجة لذلك ، فإن تسليط جهد يجعل المكثف يجمع شحنة كهربائية ، وهذا هو الشحن . وعلى النقيض ، تشغيل المفتاح S_2 يجعل الشحنة المجمعة تفرغ ، وهذا هو التفريغ .

يقسم المكثف على أساس نوع العازل الكهربائي إلى الأنواع الموضحة في الشكل ٣-١١ .

والمكـثف هو جهاز مهم لتكـوين الدوائر الكهربائيـة مثل دوائر ضبط التردد ودوائر التنعيم ويستخدم المكثف لمنع الضوضاء ولتحسين معامل القدرة** لمصابيح الفلورسنت، وله وظائف مهمة أخرى بالنسبة للقدرة الكهربائية مثل تحسين مواصفات خطوط الإرسال وبدء المحرك .



الشكل ٣ - ١١ مكثفات مختلفـة

* دائرة ضبط التردد هى دائرة رنين ، تستخدم لاختيار الموجة المرغوب فيها في جهاز استقبال لاسلكي . وسوف تعالج الدوائر الكهربائية مثل دوائر التنعيم في الفصل السادس.

** بالنسبة لمعامل القدرة ، ارجع إلى الفصل السادس من هذا الكتاب.

٣ - ٣ - ٢ السعة الكهروستاتيكية أو سعة الكهرباء الساكنة

الشحنة Q(C) المخزنة في مكثف تتناسب مع الجهد V(V) المسلط . نفترض أن ثابت التناسب هو C فيمكن كتابة العلاقة التالية :

$$Q = CV(C) \ , \ C = \frac{Q}{V} (F) \qquad (3\text{-}9)$$

ثابت التناسب C هو سعة الكهرباء الساكنة لمكثف بوحدة الفاراد، ورمز الوحدة هو F . السعة التي قيمتها 1F هي سعة كهربائية ساكنة وفيها تخزن شحنة 1 كولوم بتسليط جهد قيمته 1 ڤولت . الوحدة F كبيرة جداً للاستخدام العملي، ولكن تستخدم على سبيل المثال الميكروفاراد (μF) والبيكوفاراد (pF)[$1pF = 10^{-12}F$, $1\mu F = 10^{-6}F$] .

في الشكل ٣ - ١٢ ، افترض أن مساحة القطب هي $A(m^2)$، والمسافة بين القطبين هى $\ell(m)$ والسماحية النسبية للعازل هى $\in_r$، وسعة الكهرباء الساكنة هى $C(F)$ ويعبر عنها بالعلاقة التالية :

$$C = \in \frac{A}{\ell} = 8.85 \times 10^{-12} \in_r \frac{A}{\ell} (F) \qquad (3\text{-}10)$$

لهذا فإن سعة الكهرباء الساكنة تزداد بزيادة مساحة القطب ، وصغر المسافة بين القطبين واستخدام عازل ذي درجة سماحية كبيرة عمليًا . تزداد السعة الكهربائية الساكنة بواسطة طرق مختلفة منها تنظيم ألواح معدنية بحيث تكون متوازية وتوصل ببعضها بالتبادل كقطب، ومنها وضع العازل بين فرخين من رقائق معدنية ثم تلف، ومنها تحسين العازل .

مثال ٣

احسب سعة الكهرباء الساكنة لمكثف له شحنة قيمتها 2×10^{-6} كولوم عند تأثير جهد قيمته 10 ڤولت .

الحل

$$C = \frac{2x10^{-6}}{10} = 0.2x10^{-6}F = 0.2\ \mu F$$

سؤال ٣

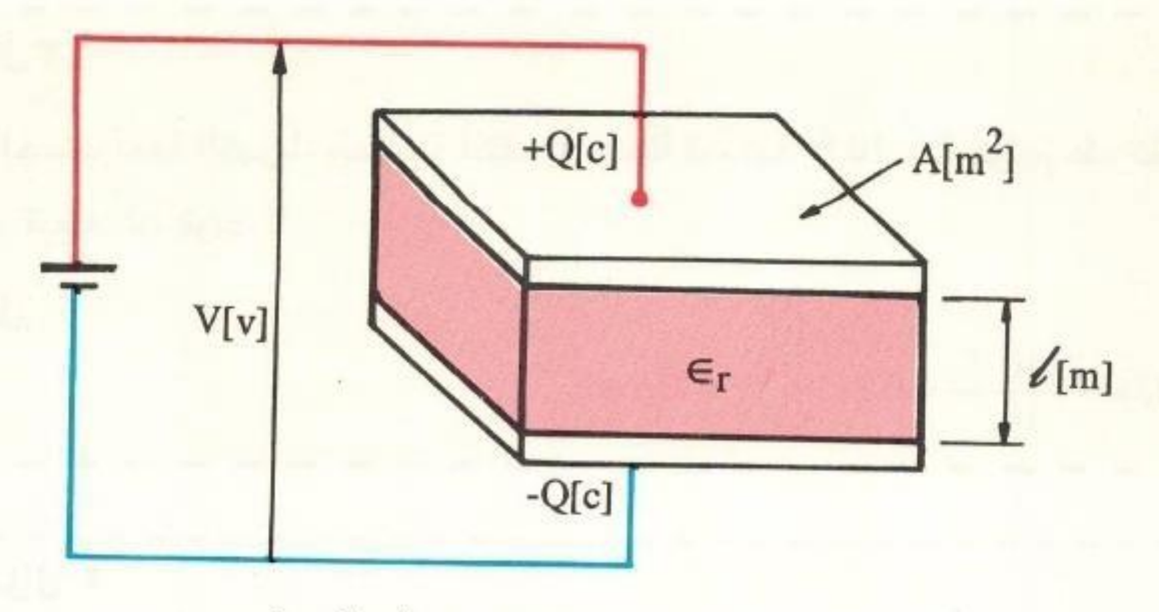
احسب الشحنة المختزنة في مكثف قيمته 10 ميكروفاراد عند تسليط جهد قيمته 20 ڤولت على المكثف .

٣ - ٣ - ٣ الطاقة المخزنة في المكثف Energy stored in capacitor

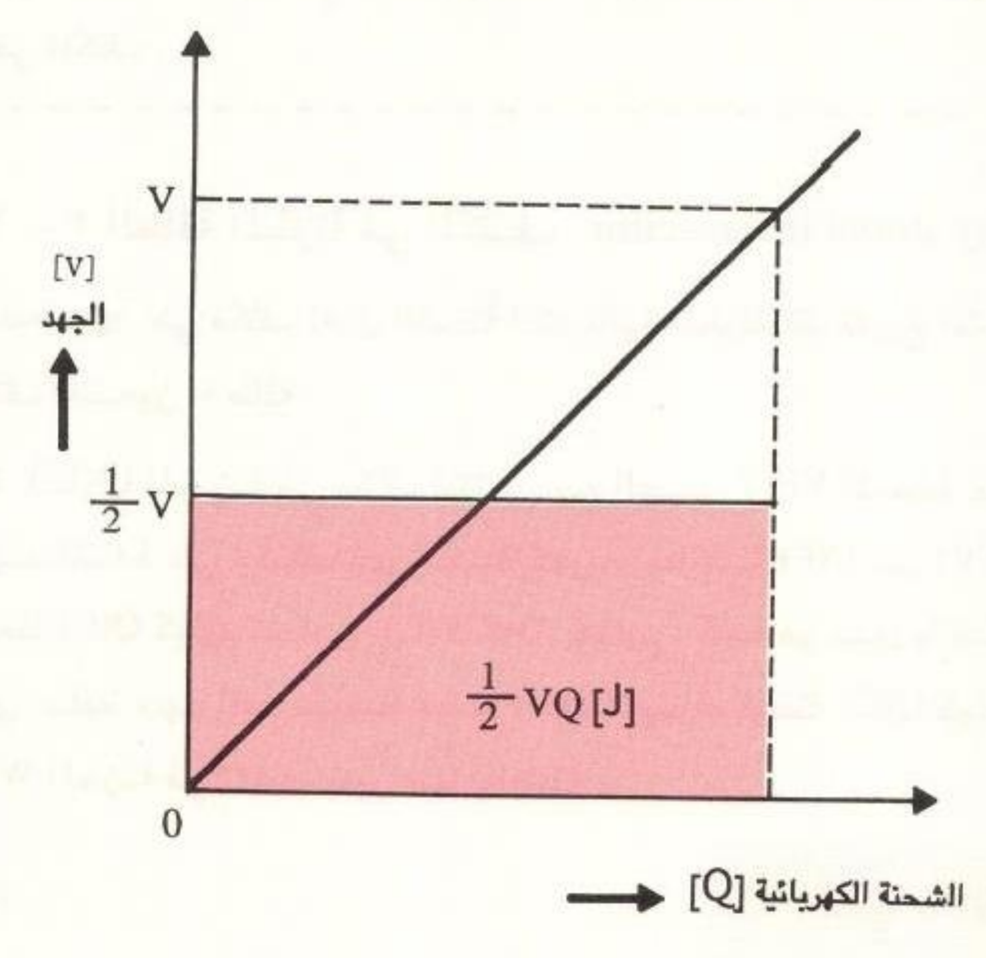
عند تسليط جهد على مكثف تعمل الشحنة الكهربائية المخزنة عند تفريغ الشحنة بالتحديد، ويكون المكثف المشحون له طاقة .

الشحنة Q(C) المخزنة في مكثف تتناسب مع الجهد V(V) المسلط على المكثف . وزيادة الجهد المسلط على مكثف ذي سعة كهرباء ساكنة C(F) من o(v) إلى v(v) يجعل الشحنة Q(C) كولوم تساوى Q=CV(C) كولوم ؛ كما هو مبين بالشكل ٣ - ١٣ . وهذا يساوي تسليط جهد ثابت متوسط قيمته V/2(V) يحرك شحنة Q(C) كولوم . حينئذٍ، الطاقة W(J) المخزنة في المكثف يعبر عنها بالعلاقة :

$$W = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^{2}(J) \qquad (3\text{-}11)$$



الشكل ٣ – ١٢ سعـة الكهرباء الساكنـة .



الشكل ٣ – ١٣ الطاقة المخزنة في مكثف

والآن ، بفرض أن مساحة اللوح في القطب هي $A(m^2)$ والمسافة بين القطبين هي ℓ (m) ، سماحية العازل هى $\in$ (F/m) ، فإن شدة المجال الكهربائى في العازل تساوى E(V/m) وكثافة السيل الكهربائى تساوى $D(C/m^2)$, $V=E\ell$, Q=DA وعند التعويض بهذه القيم في العلاقة (11 - 3) نحصل على العلاقة :

$$W = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}ED.A\ell \ (J) \qquad (3\text{-}12)$$

تخزن هذه الطاقة في العازل داخل المكثف . $A\ell$ هو حجم العازل ، والطاقة $w(J/m^3)$ لكل وحدة حجم يعبر عنها بالعلاقة :

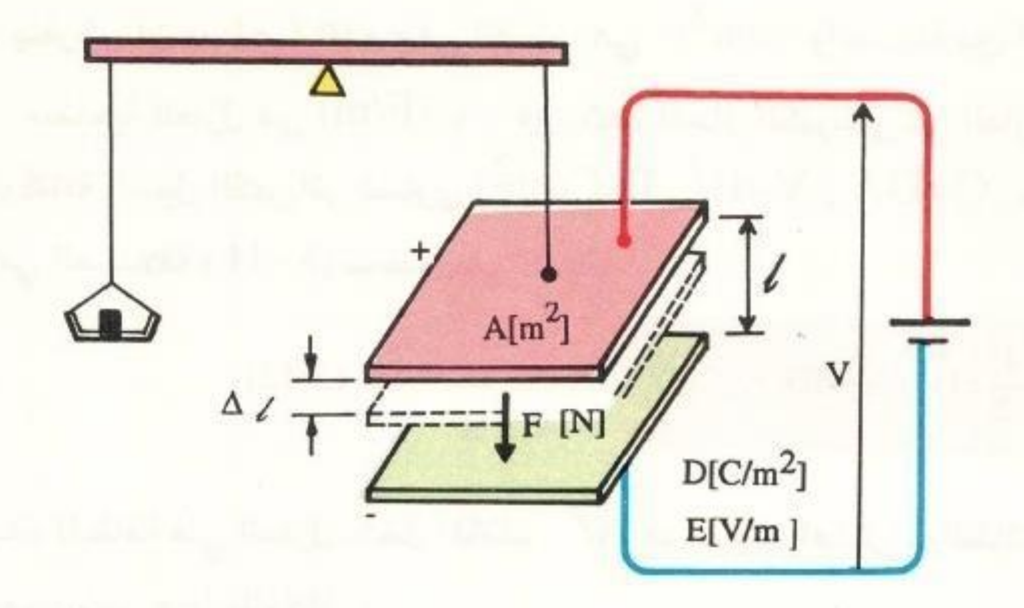
$$w = \frac{W}{E\ell} = \frac{1}{2}ED = \frac{1}{2}\in E^2 = \frac{1}{2}\cdot\frac{D^2}{\in}(J/m^3) \qquad (3\text{-}13)$$

سؤال ٤

فى الشكل ٣ – ١٢ ، نفترض أن الجهد يساوى 1000 ڤولت ، ومساحة القطب تساوى 50 سم٢ ، والمسافة ℓ بين القطبين تساوى 20 مم، والسماحية النسبية $\in_r$ تساوى 8 ، احسب الطاقة المخزنة لكل 1 م٣ .

٣ – ٣ – ٤ قوة التجاذب الكهروستاتيكية Electrostatic attractive force

كما يرى في الشكل ٣ – ١٤ ، تخزن الشحنة بتسليط جهد تيار مستمر على قطبى مكثف، وتؤثر القوة الكهربائية الساكنة على كل من القطبين .



الشكل ٣ – ١٤ قوة التجاذب الكهروستاتيكية

والآن ، بفرض أن قوة التجاذب F(N) تحرك القطب لمسافة $\Delta \ell$ (m) فإن الطاقة $\Delta W = 1/2\ ED\ .\ A\Delta \ell\ (J)$ المؤثرة في المسافة $\Delta \ell$ تقل على أساس العلاقة (3-12) . في النهاية ، فإن هذه الطاقة تساوى الشغل $F\Delta \ell$ (J) الناتج من قوة التجاذب ولهذا تستنتج العلاقة الآتية :

$$F\Delta \ell = \frac{1}{2} ED\ .A\Delta \ell$$

ومنها نحصل على

$$F = \frac{1}{2}\ EDA\ (N) \qquad (3\text{-}14)$$

بالإضافة إلى ذلك ، يعبر عن قوة التجاذب f (N/m^2) لكل وحدة مساحات بالعلاقة الآتية :

$$f = \frac{F}{A} = \frac{1}{2} ED = \frac{1}{2} \epsilon E^2 (N/m^2) \qquad (3\text{-}15)$$

بينما تكون $E = V/\ell\,(v/m)$ ، فإن العلاقة (3-15) تتحول إلى العلاقة الآتية :

$$f = \frac{1}{2}\,\frac{\in}{\ell^2}\,V^2\ (N/m^2) \qquad (3\text{-}16)$$

هذه القوة هى قوة التجاذب الكهروستاتيكية، وتستخدم في مقياس جهد الكهرباء الساكنة وماسك الأتربة الكهربائى .

سؤال ٥

فى الشكل ٣ – ١٤ ، افترض أن الجهد 1000 فولت ، ومساحة القطب 20 سم٢، والمسافة بين القطبين 2 سم ، والسماحية تساوي سماحية الهواء ، $\in_o = 8.85\text{x}10^{-12}F/m$، احسب قوة التجاذب الكهروستاتيكية المؤثرة على القطبين .

٣ – ٤ توصيل المكثفات Connection of capacitors

ينقسم التوصيل الأساسي للمكثفات إلى توصيلات على التوازى وتوصيلات على التوالى . السعة الكهروستاتيكية الكلية للدائرة يعبر عنها بسعة كهروستاتيكية واحدة تسمى بالسعة الكهروستاتيكية المركبة مثلها مثل المقاومات.

٣ – ٤ – ١ التوصيل على التوازى Parallel connection

كما يتضح من الشكل ٣ – ١٥ (أ) تحسب السعة الكهروستاتيكية المركبة $C(F)$ في حالة توصيل مكثفات لها سعات كهروستاتيكية قيمتها$C_1(F)$, $C_2(F)$, $C_3\ (F)$ على التوازى . نفترض أن تسليط جهد $V(V)$ عبر النهايتين b و a ينتج عنه شحنات قيمتها$Q_1(C)$,$Q_2(C)$, $Q_3\ (C)$ مخزنة في كل مكثف ، فتنشأ العلاقة الآتية :

$$Q_1=C_1V(C)\ ,\ Q_2=C_2V(C)\ ,\ Q_3= C_3V(C) \qquad (3\text{-}17)$$

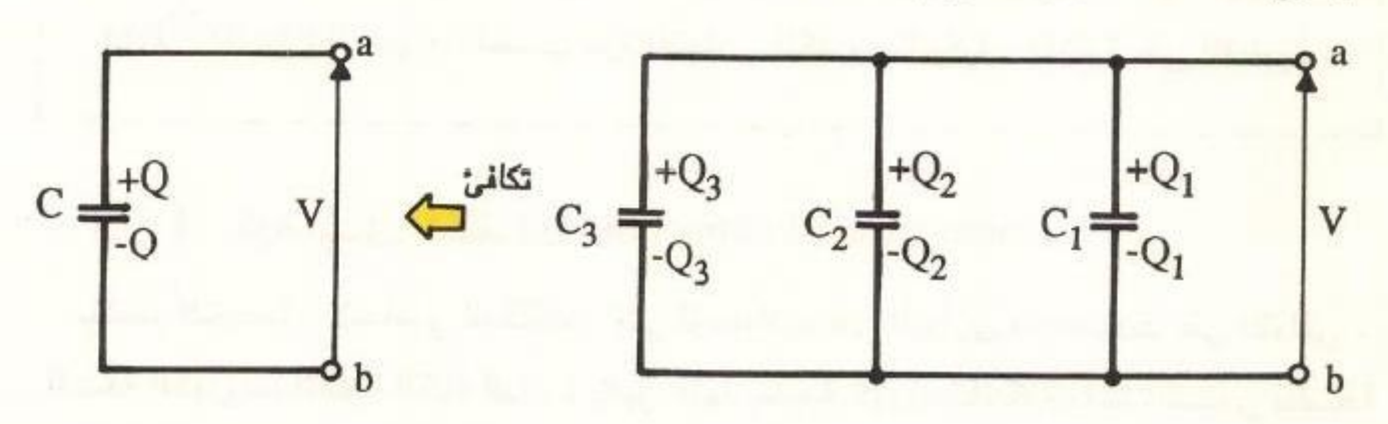
الشحنة الكلية $Q(C)$ عبر النهايتين a , b هى مجموع $Q_1(C)$, $Q_2(C)$, $Q_3(C)$ وتنتج العلاقة الآتية :

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = (C_1 + C_2 + C_3)\, V\ (C) \qquad (3\text{-}18)$$

ولهذا ، فإن السعة الكهروستاتيكية المركبة $C(F)$ المحسوبة على أساس الشكل ٣ – ١٥ (ب) يعبر عنها بالعلاقة :

$$C = \frac{Q}{V} = C_1 + C_2 + C_3\ (F) \qquad (3\text{-}19)$$

ومن ثم فإن السعة الكهروستاتيكية المركبة لدائرة مكثفات موصلة على التوازى تساوى مجموع السعات الكهروستاتيكية لكل مكثف .



الشكل ٣ – ١٥ توصيل المكثفات على التوازى

مثال ٤

على فرض أن جهداً قيمته 300 ڤولت يسلط على مكثفات موصلة على التوازى ذات سعات قيمتها 0.1 ميكروفاراد و 0.2 ميكروفاراد و 0.5 ميكروفاراد . احسب الشحنة الكلية المخزنة .

الحل

من المعادلة (3-19) : $C = 0.1 + 0.2 + 0.5 = 0.8\ \mu F$

من المعادلة (3-18) : $Q = CV = 0.8 \times 10^{-6} \times 300 = 240 \times 10^{-6}\ C = 240\ \mu C$

سؤال ٦

على فرض أن جهدا قيمته 100 ڤولت سلط على مكثفات متصلة على التوازى ذات سعات 2 ميكروفاراد و 3 ميكروفاراد و 4 ميكروفاراد. احسب الشحنة الكهربائية لكل مكثف والسعة االكهروستاتيكية المركبة .

٣ – ٤ – ٢ التوصيل على التوالى Series connection

السعة الكهروستاتيكية المركبة C(F) تحسب لمكثفات موصلة على التوالى ذات سعات C_3 (F), C_2(F), C_1(F) كما هو مبين بالشكل ٣ – ١٦ (أ) كما يلي:

نفترض أن تسليط جهد قيمته V(V) عبر النهايتين a, b يولد شحنة قيمتها ±Q(C) في القطبين المتصلين مباشرة بالنهايتين . كما هو مبين بالشكل ٣ – ١٦ (أ) ، تظهر شحنات قيمتها Q(C) +, Q(C)- في قطب الوسط بواسطة حث الكهرباء الساكنة .

هنا نفترض أن الجهود المسلطة على المكثفات هي V_1(V) , V_2(V) , V_3(V) ونحصل على العلاقة الآتية :

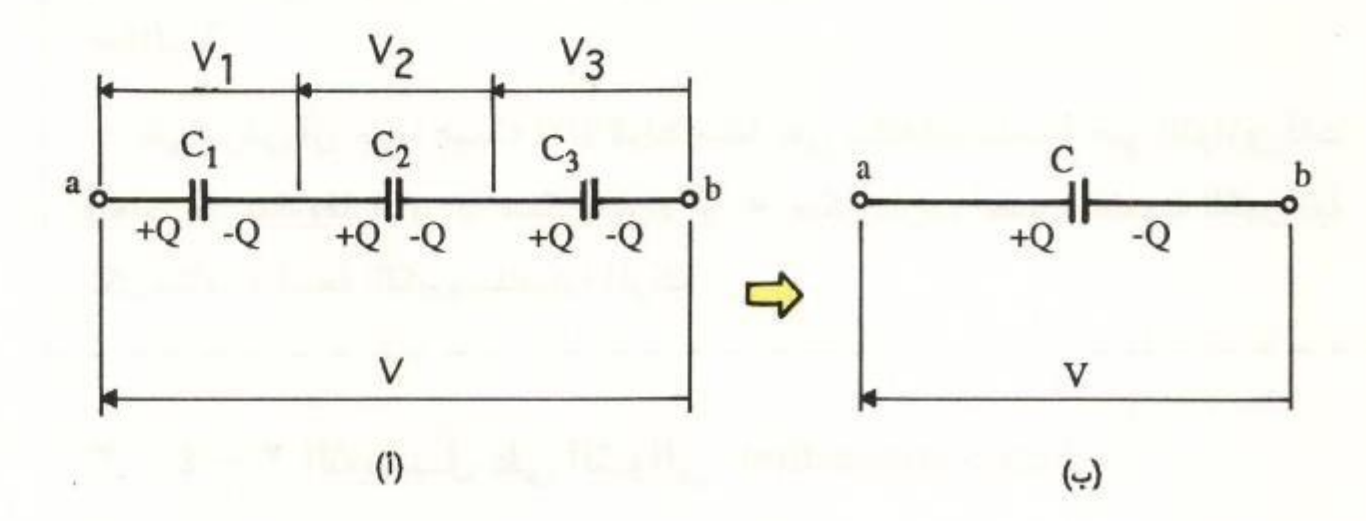
$$V_1 = \frac{Q}{C_1}\ (V)\ ,\ V_2 = \frac{Q}{C_2}\ (V)\ ,\ V_3 = \frac{Q}{C_3}(V) \qquad (3\text{-}20)$$

ولكن مجموع الجهود يساوى جهد مصدر الطاقة؛ وهو مايمكننا من أن نحصل على :

$$V = V_1+V_2+V_3 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} = Q(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3})\ (V) \qquad (3\text{-}21)$$

لهذا ، فإن العلاقة التالية تعبر عن السعة الكهروستاتيكية المركبة بناءً على الشكل ٣ – ١٦ (ب) .

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{1}{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}}(F) \qquad (3\text{-}22)$$



الشكـل ٣ – ١٦ توصيل المكثفـات على التوالـى

ونتيجة لذلك ، فإن السعة الكهروستاتيكية المركبة لدائرة موصلة على التوالي هي مجموع مقلوبات السعات الكهروستاتيكية لكل مكثف .

فيما يلى نحسب النسبة بين الجهود المسلطة على نهايتى كل مكثف في الشكل ٣–١٦ (أ) . من المعـادلة (3-20) ، فتنتج العلاقة الآتية :

$$V_1 : V_2 : V_3 = \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2} : \frac{1}{C_3}$$

ومن المعروف أن الجهد يتناسب عكسياً مع السعة الكهروستاتيكية . ولهذا فإن المكثف ذو السعة الكهروستاتيكية الكبيرة يستقبل جهداً صغيراً نسبياً ، والمكثف ذو السعة الصغيرة يستقبل جهداً كبيراً .

بالإضافة إلى ذلك ، فإن الجهد المسلط عبر النهايتين لكل مكثف يعبر عنه بالمعادلة الآتية بدلالة الجهد $V(V)$ المسلط على كل المكثفـات .

$$V_1=\frac{Q}{C_1}=\frac{CV}{C_1}=\frac{C}{C_1}V \quad (V)$$

$$V_2=\frac{C}{C_2}V \ (V), \quad V_3=\frac{C}{C_3}V \quad (V) \qquad (3\text{-}23)$$

مثال ٥

على فرض أن جهداً قيمته 100 ڤولت سلط على مكثفات متصلة على التوالى ذات سعات قيمتها 1 ميكروفاراد و 4 ميكروفاراد و 8 ميكروفاراد . احسب السعة الكهروستاتيكية المركبة C(F) والشحنة الكلية Q(C) المخزنة . كذلك احسب الجهود V_3 (V) , V_2(V), V_1(V) عبر نهايتى كل مكثف .

الحل

تبين المعادلة (3-22) السعة الكهروستاتيكية المركبة C(μF) كما يلي .

$$C=\frac{1}{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}}=\frac{1}{1+\frac{1}{4}+\frac{1}{8}}=\frac{1}{\frac{8+2+1}{8}}=\frac{8}{11}=0.727\ \mu F$$

وتبين المعادلة (3-22) الشحنة الكلية Q(C) .

$$Q=CV=0.727\times10^{-6}\times100=72.7\times10^{-6}C=72.7\ \mu C$$

ويحسب الجهد المسلط على نهايتى كل مكثف V_1 , V_2 , V_3 بالعلاقة (3-23) :

$$V_1=\frac{Q}{C_1}=\frac{72.7}{1}=72.7\ V$$

$$V_2=\frac{Q}{C_2}=\frac{72.7}{4}\ 18.2\ V$$

$$V_3=\frac{Q}{C_3}=\frac{72.7}{8}=9.1V$$

سؤال ٧

على فرض أن جهداً قيمته 30 ڤولت سلط على مكثفات متصلة على التوالى ذات سعات 2 ميكروفاراد و 3 ميكروفاراد و 6 ميكروفاراد . احسب السعة الكهروستاتيكية المركبة والجهد على طرفى كل مكثف .

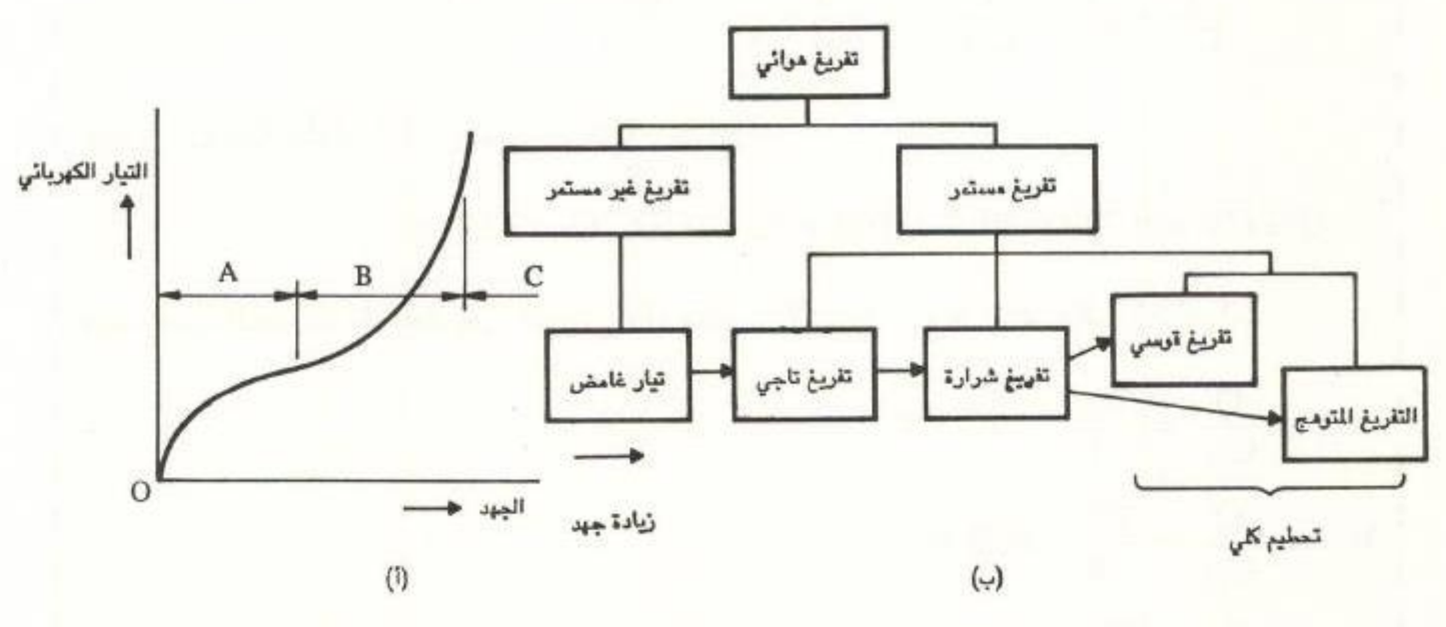
٣ – ٥ ظاهرة التفــريغ

٣ – ٥ – ١ التفـريغ Discharge

التفريغ هو ظاهرة تحرك الشحنة الكهربائية خلال الهواء والعوازل الأخرى . ويمنع العازل مرور التيار في الحالة العادية ، إلا إنه يسمح بمرور التيار تحت تأثير المجال الكهربائى الشديد .

انهيار العازل الكهربائى هو أن يصبح في حالة تفريغ عن طريق توقف عمل العازل .

فى هذا البند سنركز على دراسة التفريغ الذي يحدث في الغاز أي التفريغ الهوائى .



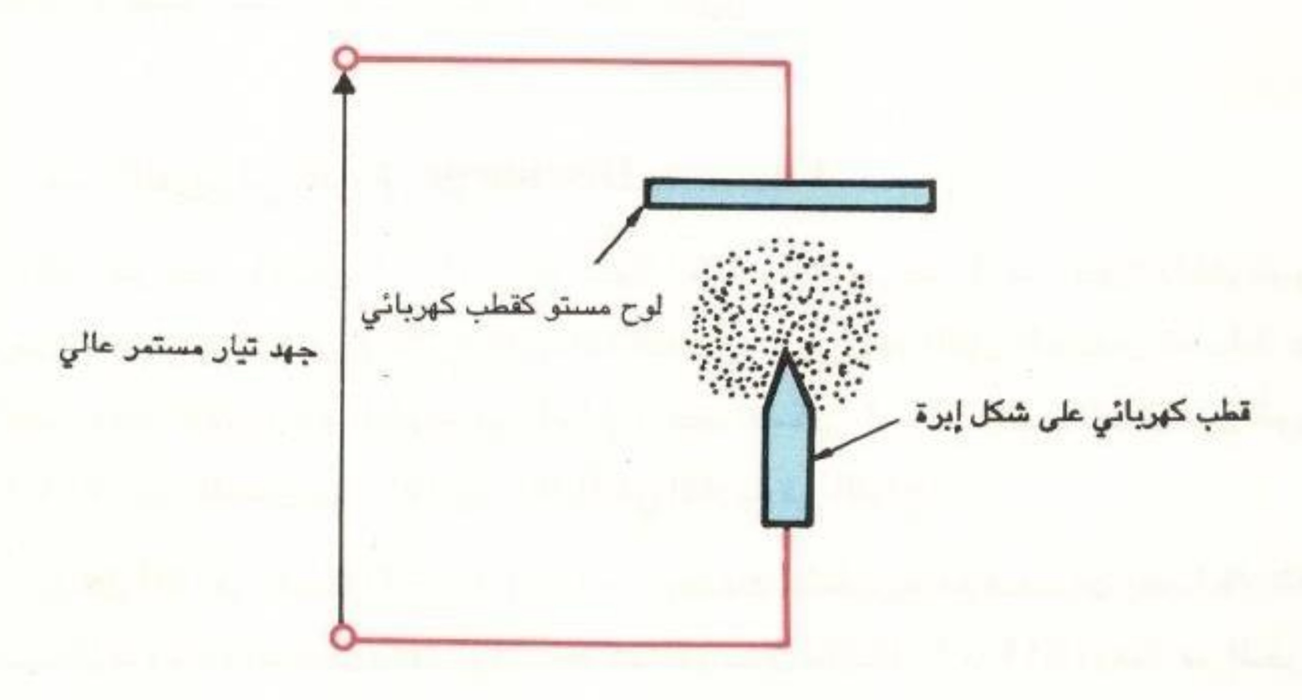
الشكل ٣ – ١٧ التفريغ الهوائى .

والآن ، نفترض أن زيادة الجهد المسلط على قطبين موضوعين في الهواء يزيد التيار تدريجياً كما يتضح من الشكل ٣ – ١٧ (أ) . في المنطقة A من الشكل ، فإن التيار يسري نتيجة لكمية صغيرة من الأيونات والإلكترونات الموجودة في الطبيعة . وفي المنطقة B ، تسبب الأيونات المتولدة مرور التيار بواسطة المجال الكهربائي المسلط . في المنطقة C ذات الجهد الكهربائي الشديد ، تنتج الأيونات باستمرار لتسبب سريان تيار تفريغ كبير مما ينتج عنه انهيار كلي .

يقسم التفريغ الهوائي إلى عدة أنواع كما هو مبين بالشكل ٣ – ١٧ (ب) .

أ – التفريغ التاجي Corona Discharge

إن تسليط جهد تيار مستمر على قطب عبارة عن لوح، وقطب آخر عبارة عن إبرة يزيد المجال الكهربائي جداً حول رأس الإبرة فينهار عزل الهواء مما ينتج عنه التفريغ بالانتشار وحدوث ضوضاء ضعيفة وضوء ضعيف ، وتسمى هذه الظاهرة بالتفريغ التاجي كما هومبين بالشكل ٣ – ١٨ .



الشكل ٣ – ١٨ التفريغ التاجي

يحدث التفريغ التاجى في خطوط إرسال الجهد العالى . والفقد التاجى ، (أو فقد القدرة) بسبب التفريغ التاجـى يعدّ مشكلة .

ب - تفريغ الشـرارة Spark Discharge

في الشكل ٣ - ١٧ (أ) ، تؤدي زيادة الجـهـد للدخـول في المنطقـة C إلى زيادة عـجلة الأيونات مما يؤدى إلى زيادة حـادة في التـيـار. وفي النهـاية، تبـعث الأقطـاب شـرارات مع ضـوضـاء شـديدة لعمل التـفـريغ . هذه الظاهرة هى تفـريغ الشـرارة . والرعـد، (الظاهرة الطبيعية) هـو في حقيقة الأمر تفريغ أيضاً .

تفريغ الشرارة هو ظاهـرة مؤقتـة تنتهي في وقت قصـير ؛ ولو أنه استمر لوقت طويل ، فإنه يحدث بعد ذلك تفريغ متوهج وتفريغ قوسي .

وتحدد قيمة الجهد لتفريغ الشرارة بالمسافة بين الأقطاب والضـغط الجـوي، ويطبق تفريغ الشرارة لقياس الجهد العالى باستخدام قطب كروى .

حـ - التفريغ في الفراغ Vacuum Discharge

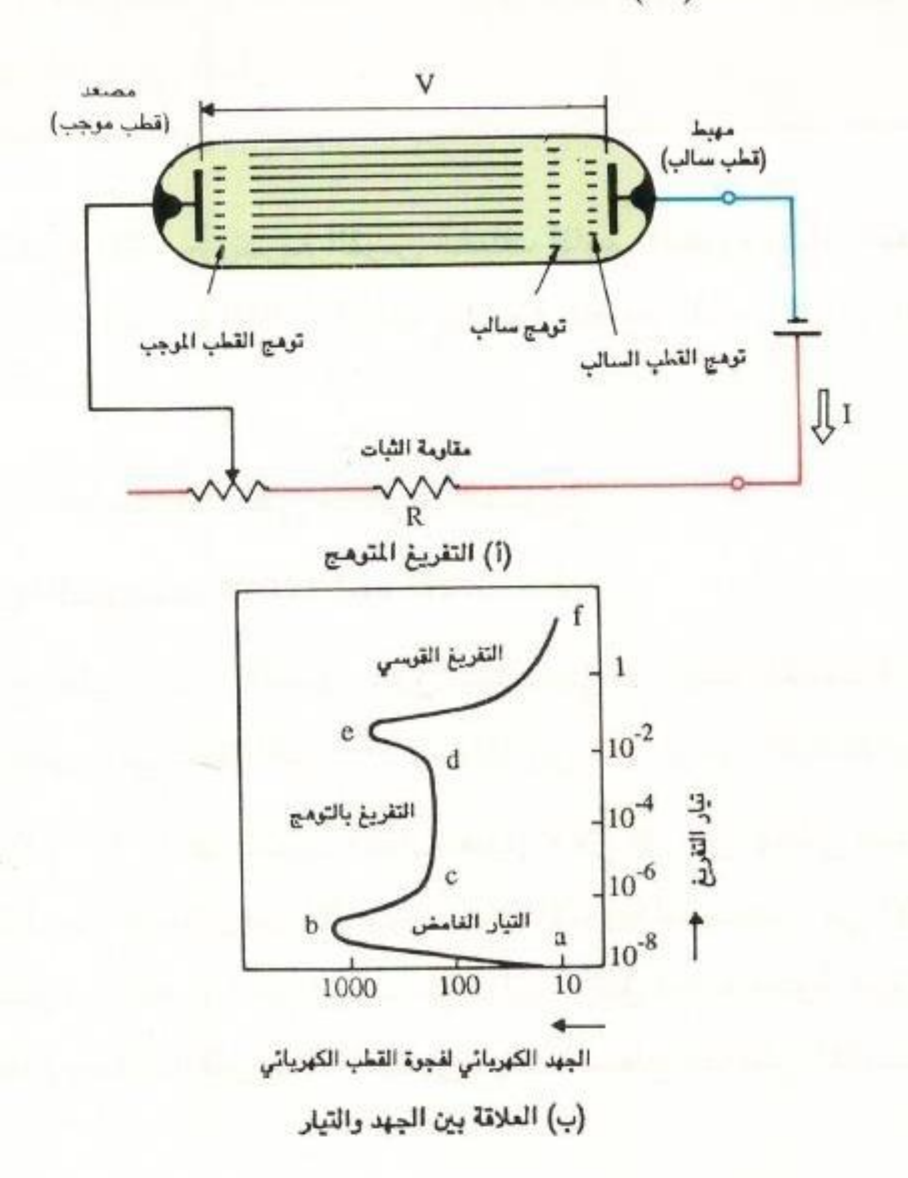
كمـا هو مبين بالشكل ٣ - ١٩ ، عند حـفظ الضـغط الجـوي عند 1 مم زئبق* داخل أنبـوبة زجاجية؛ فإنه يحدث تفريغ متنوع بالزيــادة التدريجـية في جهد التيار المســتمر المسـلط على القطب وهذا التفريغ هـو التفـريغ في الفراغ . يبين الشكل ٣ - ١٩ (ب) العلاقة بين الجهد V(V) عبر القطبين وتيار التفريغ I(A) في التفريغ في الفراغ .

خـلال cd فى الشكل ٣ - ١٩ (ب) ، يحـدث التـفـريغ مع فـتـرات إضـاءة/ ظلام مستقرة، وعادة تصحب التفريغ إضاءة كما هو مبين بالشكل ٣ - ١٩(أ) وهذا هو التفريغ بالتوهج . وكل جزء مضاء أو مظلم له مسمى مبين بالشكل ٣ - ١٩ (أ) . وتشتد الإضـاءة

غالبا في العمـود الموجب والقطب السـالب المتوهـج ، حيث تختلف ألوانهم وفقًا لأنواع الغـاز الذى يمـلأ الأنبوبة .

تؤدى أية زيـادة أخـرى في الجـهـد المسلط إلى اصطدام الأيونات بالقطب السـالب لتـفـرغ إلكترونات حـرارية وفيرة . حينئـذ يـزداد التيار ليولد تفريغ قوس مع إضاءة شديدة .

في التفريغ بالتوهج والتفريغ القوسي نحتاج إلى مقاومة كبيرة لتثبـت الخاصيـة السالبة**، كما هو مبين بالشكل ٣ – ١٩ (أ) .



(أ) التفريغ المتوهج

(ب) العلاقة بين الجهد والتيار

الشكل ٣ – ١٩   التفـريغ في الفراغ

* ضغط جوى واحد = 760مم زئبق = 101325 باسكـــال .

1 مم زئبق = 133.322 باسكال ، حيث 1 باسكال يرمز له بالرمز Pa وهو مقدار ضغط 1 نيوتن مؤثـرة على 1 م٢ .

** الخاصية السالبة هى ظاهرة العلاقة بين الجهد والتيار، وفيها زيادة أحدهما يؤدى الى نقص الآخر ، وهذا يجعل التفريغ غير ثابت، وإدخال مقاومة كبيرة R في دائرة يزيد RI في حالة زيادة التيار I ليقلل جهد النهاية V للقوس مما ينتج عنه منع أية زيادة أخرى في التيار .

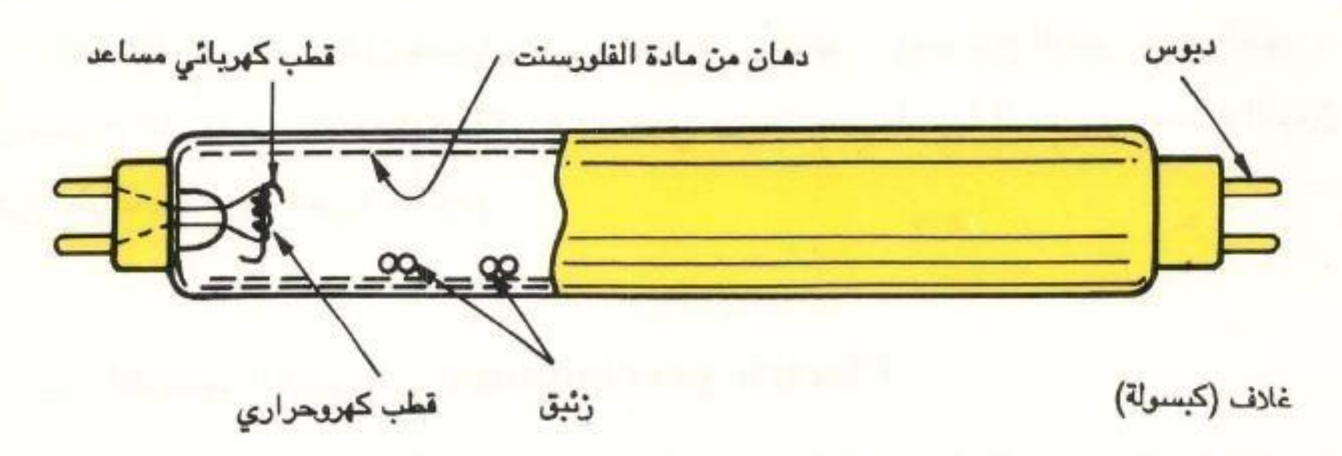
يستخدم التفريغ بالتوهج وتفريغ القوس لمختلف أنابيب التفريغ ولمبات التفريغ . تستخدم الحرارة ذات درجات الحرارة العالية المتولدة بواسطة التفريغ القوسى للحام بالقوس .

٣ – ٥ – ٢ تطبيقـات على ظاهرة التفـريغ

أ – المصباح الفلورسنت Fluorescent lamp

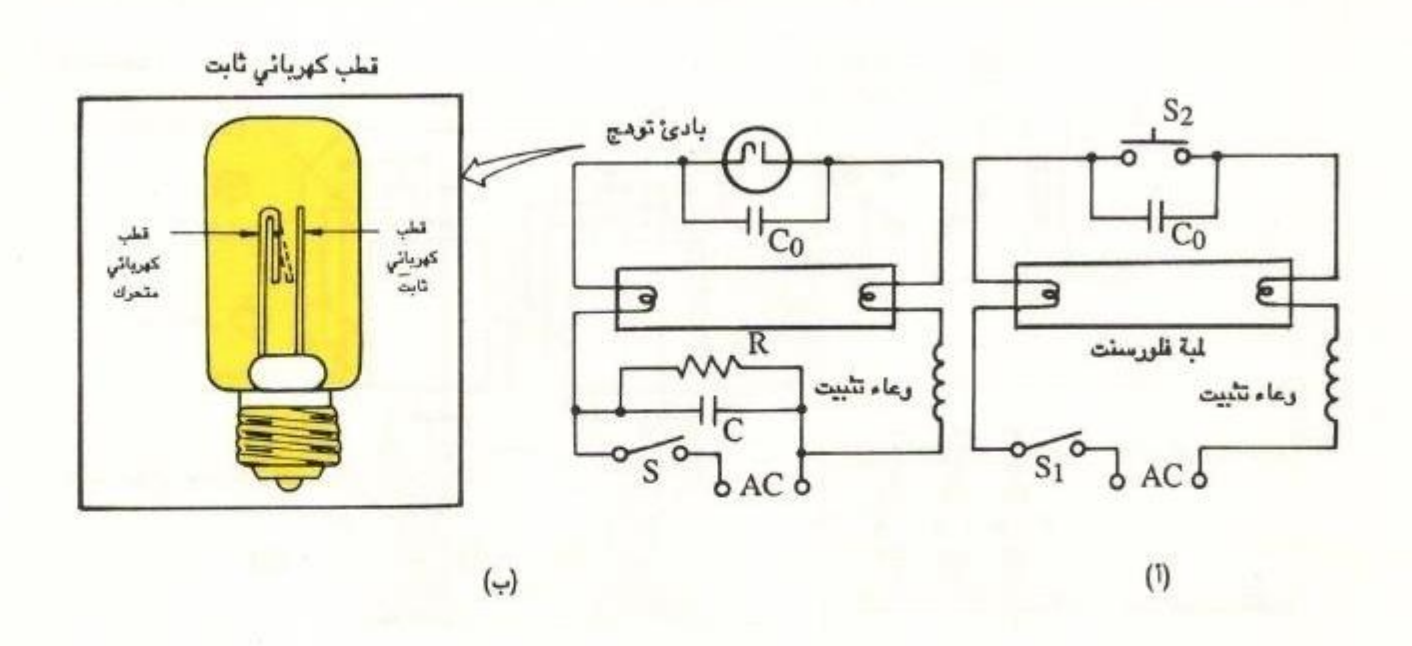
في المصباح الفلورسنت ، الضـوء فوق البنفسجي ذو الموجة القصيرة المتولد بواسطـة تفريغ القوس يصوب إلى مادة الفلورسنت ليحولها إلى ضوء مرئى للاستخدام في الإضاءة .

في الشكل ٣ – ٢٠ ، عند تثبيت أقطاب حرارية في كل من نهايتى أنبوبة زجاجيـة وفي حالة وضع قليل من الزئبق وغاز الأرجون داخل الأنبوبة للمساعدة في الإضـاءة، تصطدم الإلكترونات الحرارية المصوبة من القطب مع ذرات الزئبق لتشع ضوءًا فـوق بنفسـجى . ذلك الضـوء يصطدم بمـادة الفلورسنت المدهون بهـا السطح الداخلى للأنبـوبة فـتـضـىء .



الشكل ٣ - ٢٠ مصباح الفلورسنت .

يستخدم المصباح الفلورسنت بصورة واسعة للإضاءة العامة على أساس حرية ضبط لون الإضاءة عن طريق تغير مادة الفلورسنت ، وبالمقارنة بالمصباح المتوهج فإنه أكفأ ، وأحياناً ذو عمر أطول . إلا أن له بعض العيوب مثل الارتعاش ، ومعامل القدرة المنخفض، وحدوث الضوضاء .

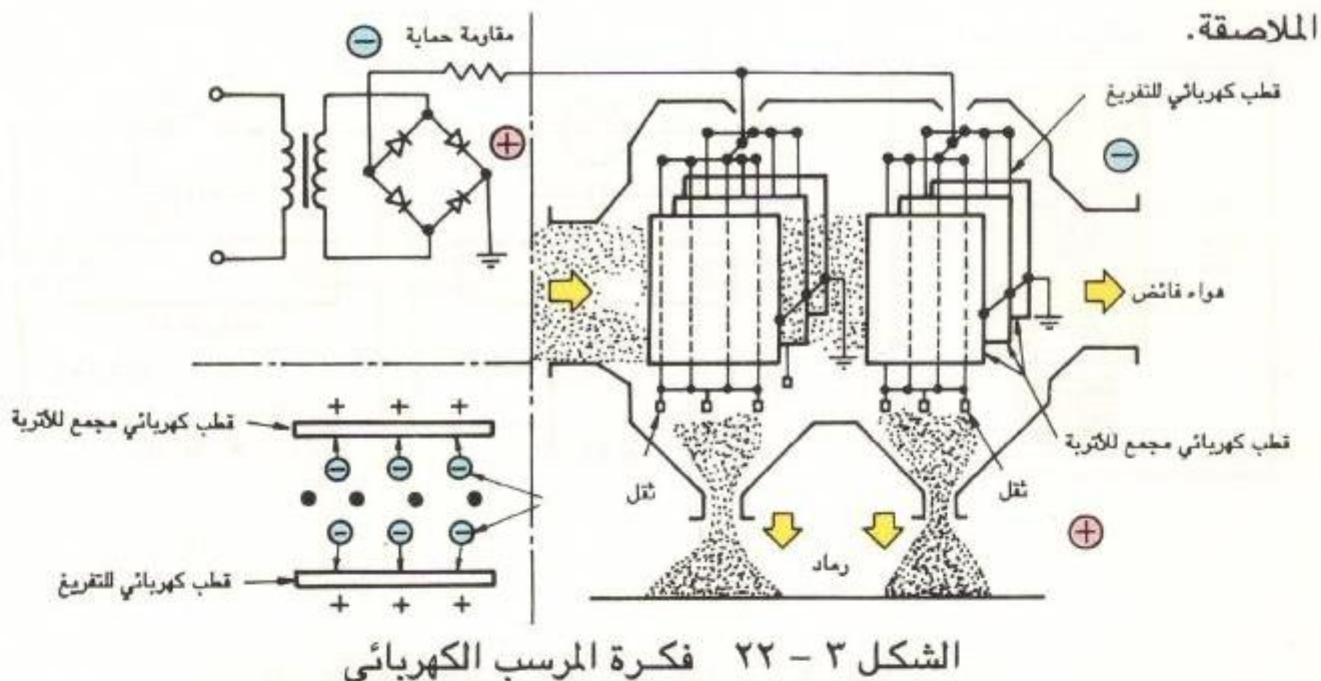


الشكل ٣ - ٢١ نظام إضاءة مصباح الفلورسنت .

بالإضافة إلى ذلك ، فإن مصباح الزئبق منخفض الجهد ، ومصباح الزئبق عالي الجهد ، ومصباح الصوديوم باستخدام التفريغ القوسي، وكذلك ضوء أنبوبة النيون ومصباح النيون هى تطبيقات أخرى للتفريغ بالتوهج .

ب - الترسيب الكهربائى Electric precipitation

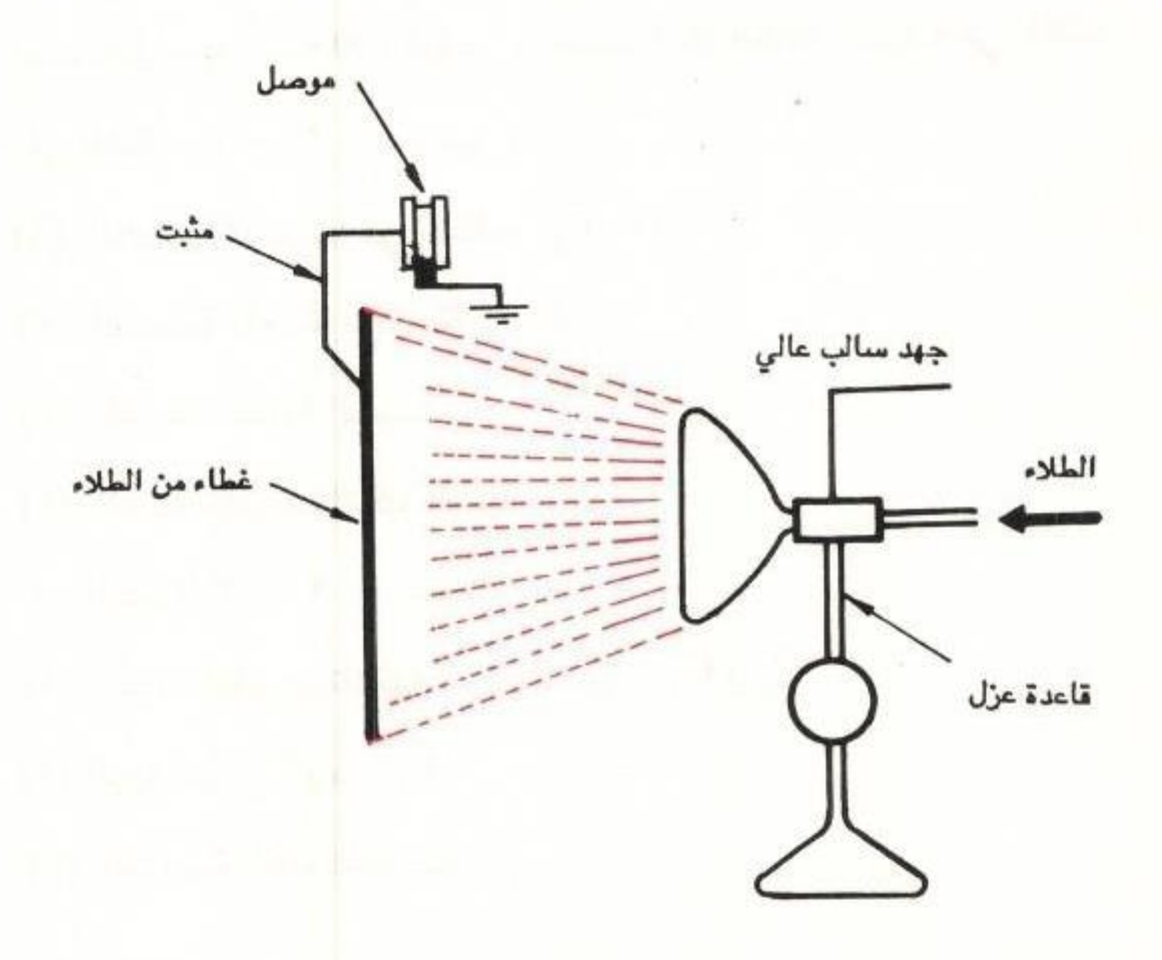
الترسيب الكهربائى هو نظام لامتصاص الجزيئات الدقيقة مثل الدخان والأتربة المكهربة بواسطة قوة كهربائية ساكنة ، ويستخدم الترسيب الكهربائى لمنع الدخان واسترداد المكونات الفاعلة التي لم تسترد. كما هو مبين بالشكل ٣ – ٢٢ ،نجد أن التفريغ التاجى ينتج من جهد تيار مستمر عالٍ قيمته بعض عشرات الألوف من الفولتات مسلط على قطب تفريغ مشكل على هيئة إبرة (أى قطب سالب) معلق لأسفل بين اللوحين المتوازيين لقطبى الترسيب (أى أقطاب موجبة). في حين نجد أن الدخان والجزيئات الدقيقة المعلقة في الغاز المار خلال كل من القطبين يتكهرب بالسالب فينتج عن ذلك انجذابها إلى القطب الموجب . وتتجمع المادة الملاصقة لقطب الترسيب بواسطة الدق على القطبين ليهتزا فيحُل التصاقهما وتتساقط المادة الملاصقة.



الشكل ٣ – ٢٢ فكـرة المرسب الكهربائى

حـ - الطـلاء بالكهرباء الساكنـة Electrostatic coating

الطلاء بالكهرباء الساكنة هو نظام له فكرة المرسب الكهربائى نفسها، ويستخدم لعمل طـلاء بواسطة قوة الكهرباء الساكنة . وتؤدى طريقة الطلاء هذه إلى نتائج ممتازة و كفاءة عالية في الاستخدام خاصة في حالة طلاء اعداد كبيرة من الأشياء ، ويوضح الشكل ٣ – ٢٣ طريقة الطلاء بالكهرباء الساكنة وذلك عن طريق وجود جهد عالٍ وتيار مستمر سالب يسلط على قطب معـزول فارغ ، على شكل قبـة ومـرشوش من جهـة المثبت المعـزول . ثم يجب أن تكهرب الجزئيات الدقيقة للدهان بالسالب حيث يلتصق الدهان بسطح الشيء . وتستخدم هذه الطريقة في السيارات والأجهزة الكهربائية المختلفة.



الشكل ٣ – ٢٣ الطـلاء بالكهرباء الساكنـة .

تمارين

١ - على فرض أن قوة تنافر قيمتها 10 نيوتن تؤثر على شحنتين متساويتين في المقدار ومن النوع نفسه بينهما مسافة 3 م في الهواء . احسب قيمة الشحنتين بالكولوم .

٢ - على فرض أن شحنة قيمتها 10 كولوم وضعت في مجال كهربائى شدته 5 ڤولت/م . احسب القوة المؤثرة على هذه الشحنة .

٣ - احسب الشحنة المخزنة في مكثف ذى سعة كهروستاتيكية قيمتها 5 ميكروفاراد تحت تأثير جهد قيمته 100 ڤولت . احسب كذلك الطاقة المخزنة في المكثف .

٤ - فى الشكل ٣ - ٢٤ ، احسب :

(١) الشحنة المخزنة في المكثف C_1،

(٢) الشحنة المخزنة في المكثف C_2،

(٣) الشحنة المخزنة الكلية ،

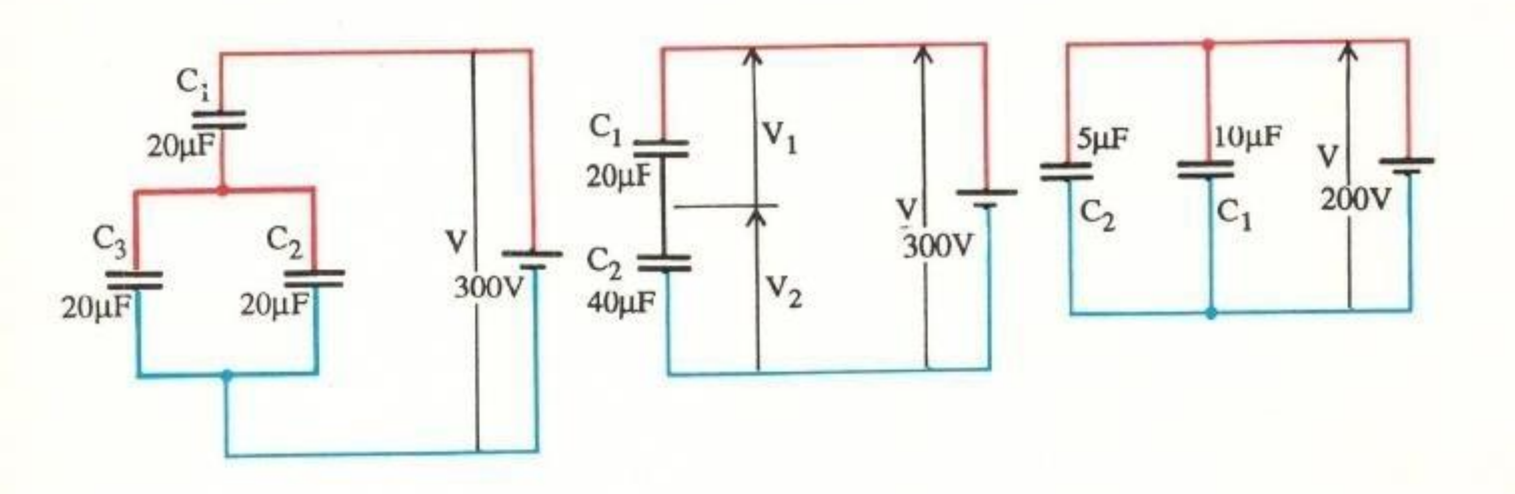
(٤) السعة الكهروستاتيكية المركبة .

٥ - فى الشكل ٣ - ٢٥ ، احسب :

(١) السعة الكهروستاتيكية المركبة من C_1 و C_2

(٢) الجهد عبر C_1 وعبر C_2

(٣) الشحنة الكلية المخزنة .



الشكل ٣ – ٢٦ الشكل ٣ –٢٥ الشكل ٣ – ٢٤

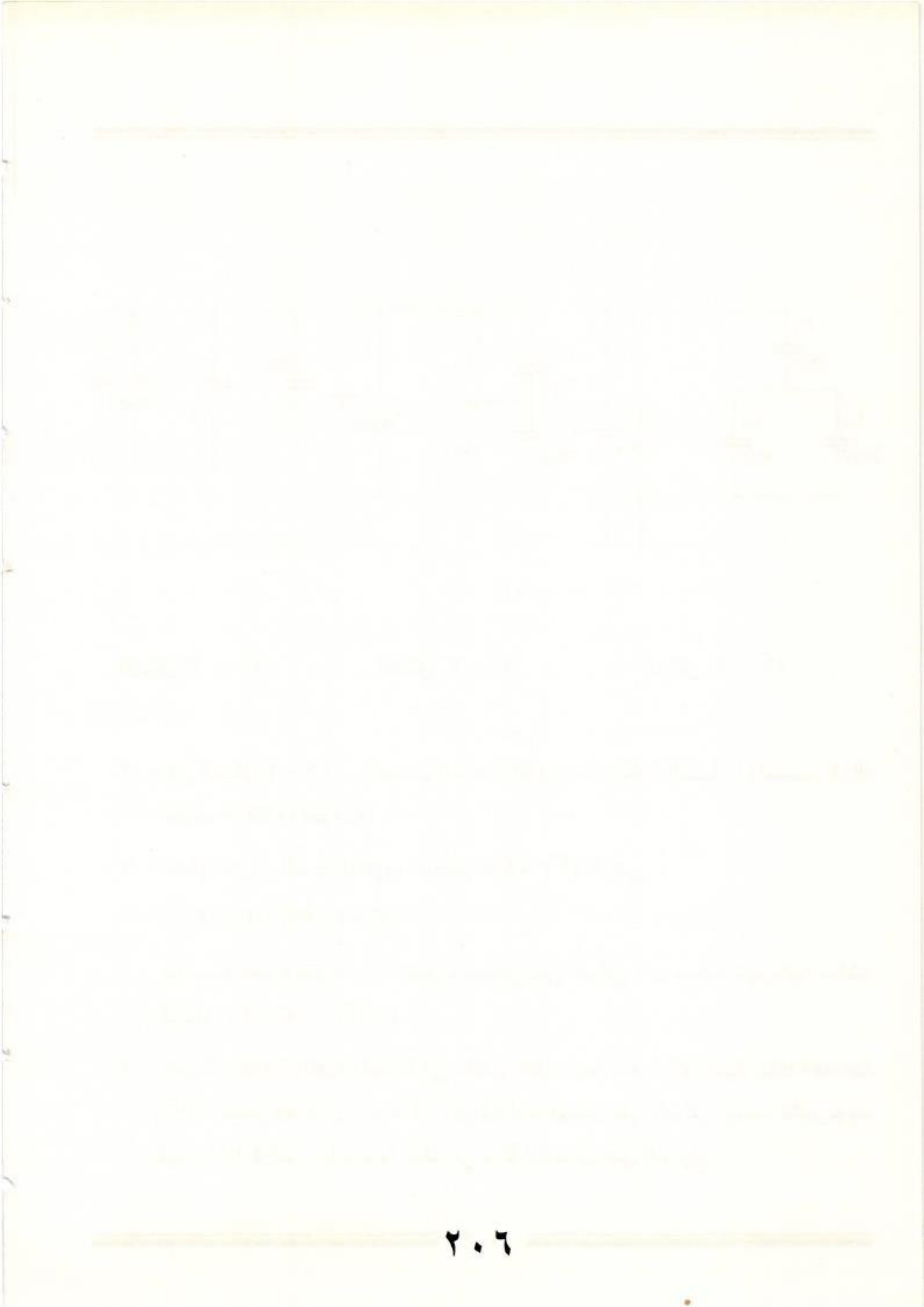
٦ – فى الشكل ٣ – ٢٦ . احسب السعة الكهروستاتيكية الكلية ؛ واحسب كذلك الشحنة الكلية المخزنة .

٧ – تحقق من أن السعة الكهروستاتيكية المركبة $C(F)$ هي :

$$C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$$

بالنسبة لدائرة مكونة من مكثفين متصلين على التوالى ذات سعة كهربائية ساكنة قيمتها $C_1(F)$, $C_2(F)$

٨ – احسب الطاقة الكلية المخزنة في مكثفين لكل منهما سعة كهربائية ساكنة قيمتها $C_1=$ 2 ميكروفاراد و C_2 = 4 ميكروفاراد موصلين على التوالى، وتحت تأثير جهد قيمته 100 ڤولت . واحسبها كذلك في حالة التوصيل على التوازي .



الفصل الرابع
دائرة التيار المتغير
AC circuit

يستخدم التيار المتغير (الذى تتغير قيمته واتجاهه مع الزمن) فى الآلات الكهربائية والأجهزة والمعدات التي نستعملها في المصنع والمنزل . ويسمى مصدر القدرة الكهربائى للتيار المتغير بمصدر قدرة التيار المتغير، وتسمى الدائرة المتصلة بمصدر قدرة التيار المتغير بدائرة التيار المتغير .

ويستخدم التيار المتغير أيضًا على نطاق واسع في محطات الكهرباء حيث إن المولدات الضخمة في هذه المحطات يمكن رفع جهد التيار المتردد الناتج منها باستخدام المحولات ونقله لمسافات بعيدة بطريقة مناسبة . كما إن عملية خفض الجهد ورفعه ذات أهمية بالغة للاستخدامات المختلفة .

وفي هذا الفصل سيتم أولاً شرح العمليات الأساسية للتيار المتغير الجيبي، وبعد ذلك سندرس دوائر التيار المتغير التي تحتوى على مقاومة وملف ومكثف .

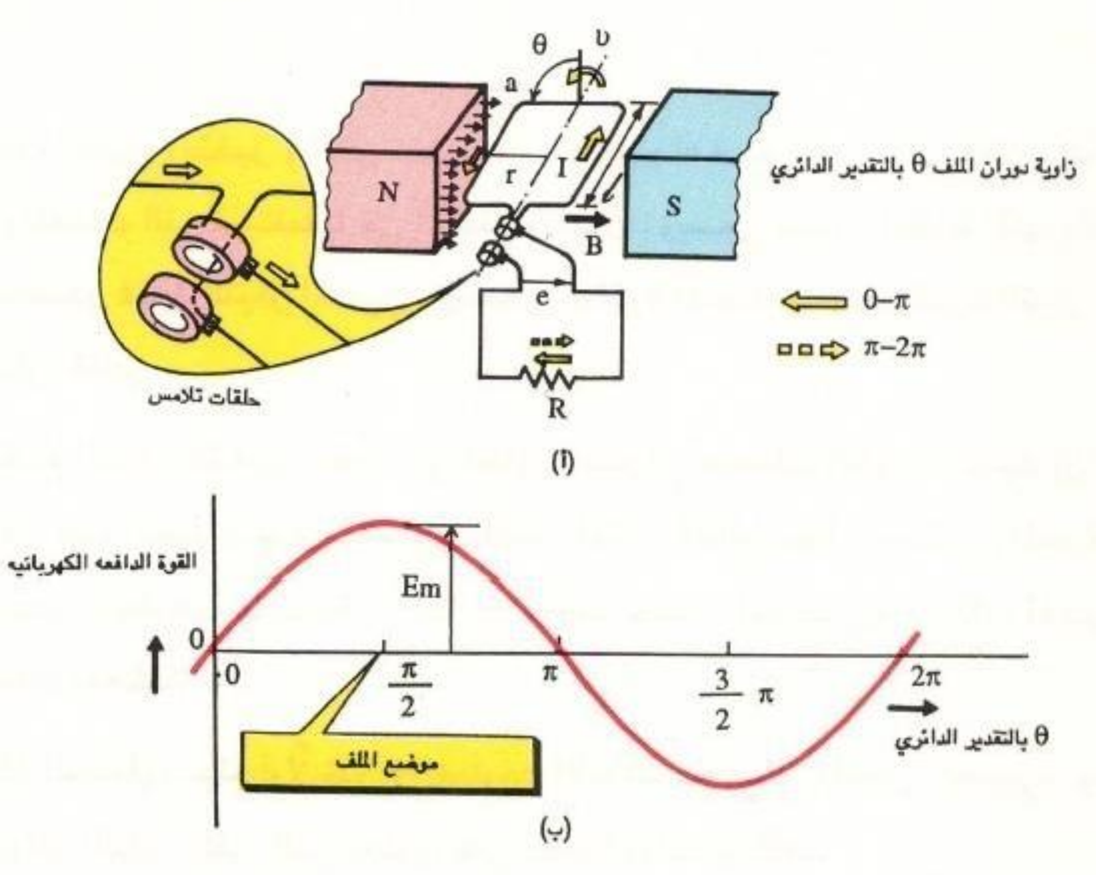
٤ – ١ التيار المتغير ذو الموجة الجيبية Sinusoidal wave

٤ – ١ – ١ توليد التيار المتغير ذي الموجة الجيبية

يستخدم التيار المتغير كمصدر قدرة في المصنع والمنزل ، ويمكن التعبير عن التيار المتغير والجهد المتغير كدالة في الزمن في صورة منحنى جيبي، ولذا يسمى هذا التيار باسم التيار المتغير ذي الموجة الجيبية .

ويبين الشكل ٤ – ١ (أ) أنه عند وضع ملف في مجال مغناطيسى منتظم ثم إدارة هذا

الملف في الاتجاه المبين بالشكل بسرعة ثابتة، تتولد قوة دافعة كهربائية يتغير اتجاهها دوريًا مع وضع الملف طبقًا لقاعدة اليد اليمنى لفلمنج أما الشكل الجـيبى المبين في الشكل ٤-١ (ب) فيوضح تغير قيمة القوة الدافعة الكهربائية المأخوذة باستخدام حلقتي تلامس متصلتين بالحمل



الشكل ٤ – ١ توليد التيار المتغير ذي الموجة الجيبيــة .

يمكن تمثيل القوة الدافعة الكهربائية $e(V)$ لهذا التيار المتغير ذي الموجة الجيبية بالمعادلة الآتية :

$$e = E_m \sin\theta \quad (V) \qquad (4-1)$$

حيث أن القوة الدافعة الكهربائية (e) هى دالة في زاوية دوران الملف (θ)، وتتغير قيمتها واتجاهها مع وضع الملف لتعطى القيمة اللحظية للجهد . وتتحدد القيمة القصوى (E_m) لهذا الجهد بطول وعدد لفات الملف، و شدة المجال المغناطيسي، و سرعة الدوران .

٤ – ١ – ٢ التعبير عن الزاوية والسرعة الزاوية Angular velocity

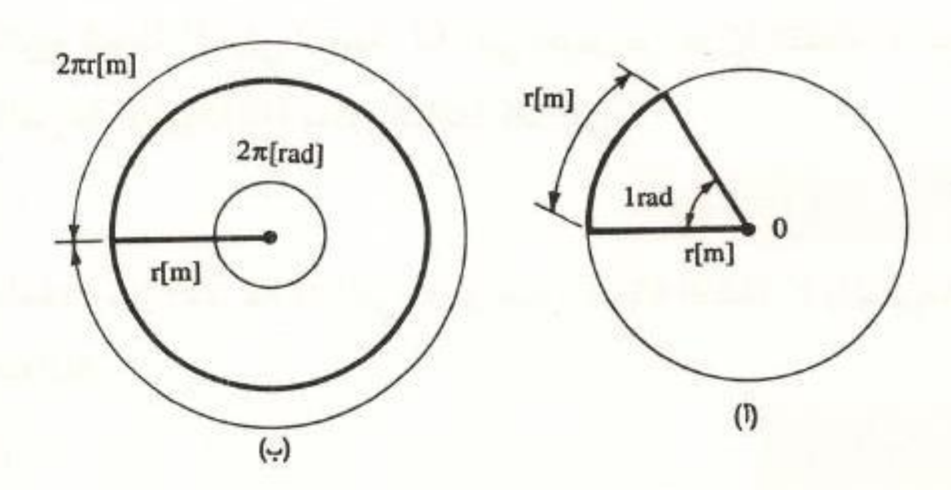
أ – الطريقة الدائرية

يمكن قياس الزاوية بالتقدير الدائري (رمز الوحدة هو rad) وأيضًا بالدرجات (رمز الوحدة (O)) . ويستخدم التقدير الدائرى للحسابات النظرية . والتعبير عن الزاوية باستخدام التقدير الدائرى يسمى الطريقة الدائرية (انظر الجدول ٤–١) .

درجـــة	45	57.3	90	180	270	360
وحدة قياس الـــزاويـــة	$\frac{\pi}{4}$	1	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3}{2}\pi$	2π

الجدول ٤ – ١ تحويل التقدير الدائري لقياس الزوايا

وفى الشكل ٤ – ٢ (أ) نجد دائرة نصف قطرها (r) . وتعرف وحدة التقدير الدائرى للزاوية (rad) بأنها الزاوية المركزية التي يقابلها قوس طوله يساوى نصف قطر الدائرة . أما الشكل ٤ – ٢ (ب) فيبين أن محيط الدائرة ($2\pi r$) يقابله زاوية مركزية قيمتها(2π) بالتقدير الدائري، وذلك بقسمة طول المحيط على طول قوس زاوية وحدة التقدير الدائرى .

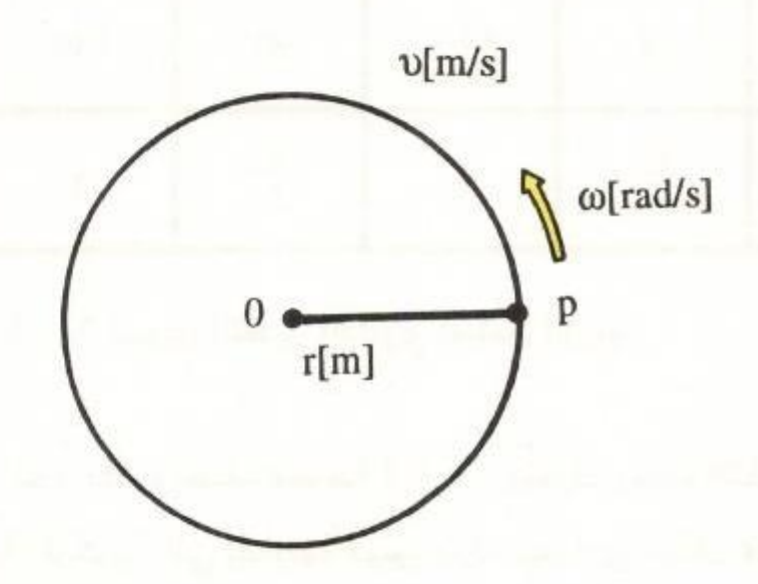


الشكل ٤ – ٢ الطريقة الدائريــة

ب- السرعة الزاوية

في الشكل ٤ – ٣ نفترض أن النقطة (P) لها حركة دائرية منتظمة بمعدل (f) دورة كل ثانية في عكس اتجاه عقارب الساعة حول النقطة (O) فتكون سرعتها υ(m/s) طبقًا للمعادلة :

$$\upsilon = 2\pi rf \quad (m/s) \qquad (4-2)$$



الشكل ٤ – ٣ الحركة الدائرية المنتظمة والسرعة الزاوية

السرعة الزاوية للنقطة P إلى النقطة O هى تعبير عن حركة النقطة P مع زاوية دوران الخط OP والسرعة الزاوية (ω) يمكن كتابتها كما يلى :

$$\omega = 2\pi f \qquad (rad/s) \qquad (4-3)$$

ولهذا فإن العلاقة بين السرعة υ التي تعبر عن حركة النقطة P والسرعة الزاوية (ω) تتحدد طبقًا للمعادلة :

$$\upsilon = r\omega \quad (m/s) \qquad (4-4)$$

في الشكل ٤ – ١ تتولد القوة الدافعة الكهربائية للتيار المتغير الجيبى التي تقوم بتكرار الشكل الموجــى (f) مرة كل ثانية ، وذلك بواسطة دوران الملف (f) مرة كل ثانية .

٤ – ١ – ٣ زمـن الدورة والتردد Period and frequency

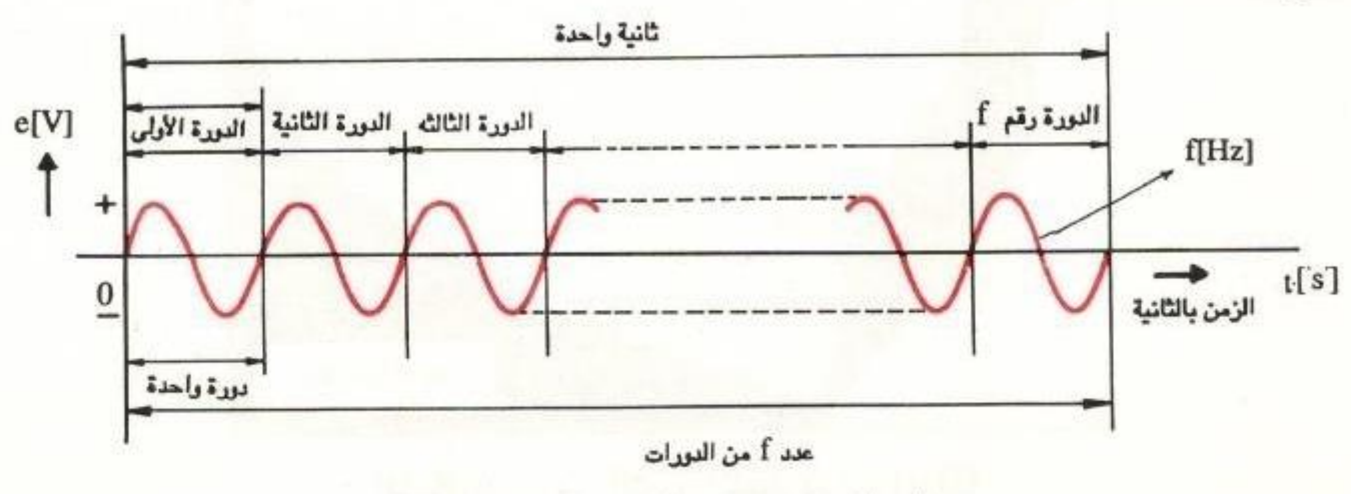
تتـغير سـعة الجـهد والتـيار المتـغيـر (كمـا فـي الشكل ٤ – ٤) دوريًا مع الزمـن، وتتكرر التغيرات نفسـها كل زمن T(s) . ويسـمى التـغير الموجى المفرد الذى يتكرر « بدورة واحـدة ». والدورة T(s) هى الزمن اللازم لدورة كاملة، والتردد هو عـدد الدورات التـي تتكرر كل ثانيـة . ويرمز للتردد بالرمز f ووحدة قياس التردد هى الهرتز (Hz) . أما الترددات العالية فوحدات قياسـها هى الكليوهــرتز (kHz) والميـجــاهرتز (MHz) والجـيـجـاهرتز (GHz) .

$1kHz = 10^3$ Hz, $1MHz = 10^6$ Hz, $1GHz = 10^9$ Hz

والعلاقة بين التردد f(Hz) والدورة T(s) هـى :

$$f = \frac{1}{T} \quad (Hz) \quad , \qquad T = \frac{1}{f} \quad (s) \qquad (4-5)$$

لاحظ أن ω(rad/s) فى المعادلة (3- 4) هـى التردد الدائرى أو الزاوي أمـا f(Hz) فهى التردد .



الشكل ٤ – ٤ الدورة الزمنية والتردد

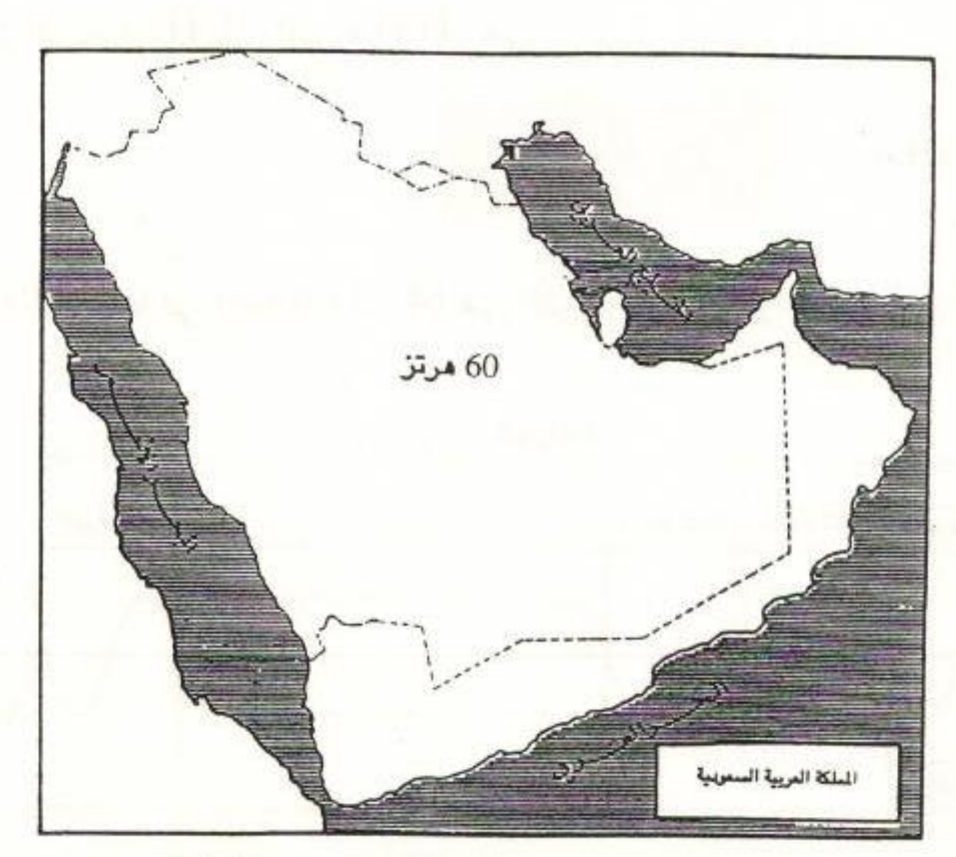
لنفترض أن عدد الأقطاب المغناطيسية في مولد التيار المتغير أو محرك التيار المتغير هو (P) وأن سرعة الدوران هى $n_S(rpm)$ نحصل على تيار متغير تردده (p/2) . وعلى هذا فإن هناك علاقة بين التردد $f(Hz)$ وسرعة الدوران $n_S(rpm)$.

الترددات التجارية في الدولة

يبين الشكل ٤ – ٥ ترددات التيار المتغير الذى تنتجه شركات الكهرباء لتغذية المصانع والمنازل : وهي 60 هرتز في أنحاء المملكة كافة وتسمى بالترددات التجارية .

والفرق في التردد ينشأ من مكان استيراد المولد والمحرك فهو بتردد 50 هرتز في أوربا، وبتردد 60 هرتز في الولايات المتحدة الأمريكية .

$$f = \frac{p}{2} \cdot \frac{n_s}{60} = \frac{pn_s}{120} \; (Hz), \qquad n_s = \frac{120\,f}{p} \; (rpm) \qquad (4-6)$$



الشكل ٤ – ٥ التردد التجاري في المملكة

سؤال١

احسب قيمة 120 بالتقدير الدائري . ثم احسب قيمة الزاوية الدائرية $(\frac{\pi}{6})$ بالدرجات .

سؤال٢

في الشكل ٤ – ٣ نفترض أن P تقوم بحركة دائرية منتظمة 50 مرة في الثانية. احسب السرعة υ (m/s) والسرعة الزاوية ω(rad/s) للنقطة P إذا كان نصف قطر الدائرة يساوى 1 م .

سؤال ٣

احسب الدورة الزمنية للتيار المتغير ذي الموجة الجيبية عند ترددات 50 هرتز، 1 كيلو هرتز .

سؤال ٤

احسب تردد التيار المتغير ذي الموجة الجيبية إذا كان زمن الدورة يساوى 40 ميللى ثانية، ومرة أخرى عند 20 ميكروثانية .

٤ – ١ – ٤ قيمة التيار المتغير

توضح المعادلة (1 - 4) التعبير الرياضى للقيمة اللحظية لجهد التيار المتغير الجيبى. وعند التعبير عن زاوية دوران الملف θ (rad) بدلالة التردد الدائرى ω(rad/s) والزمن t (s) نحصل على المعادلة الآتية :

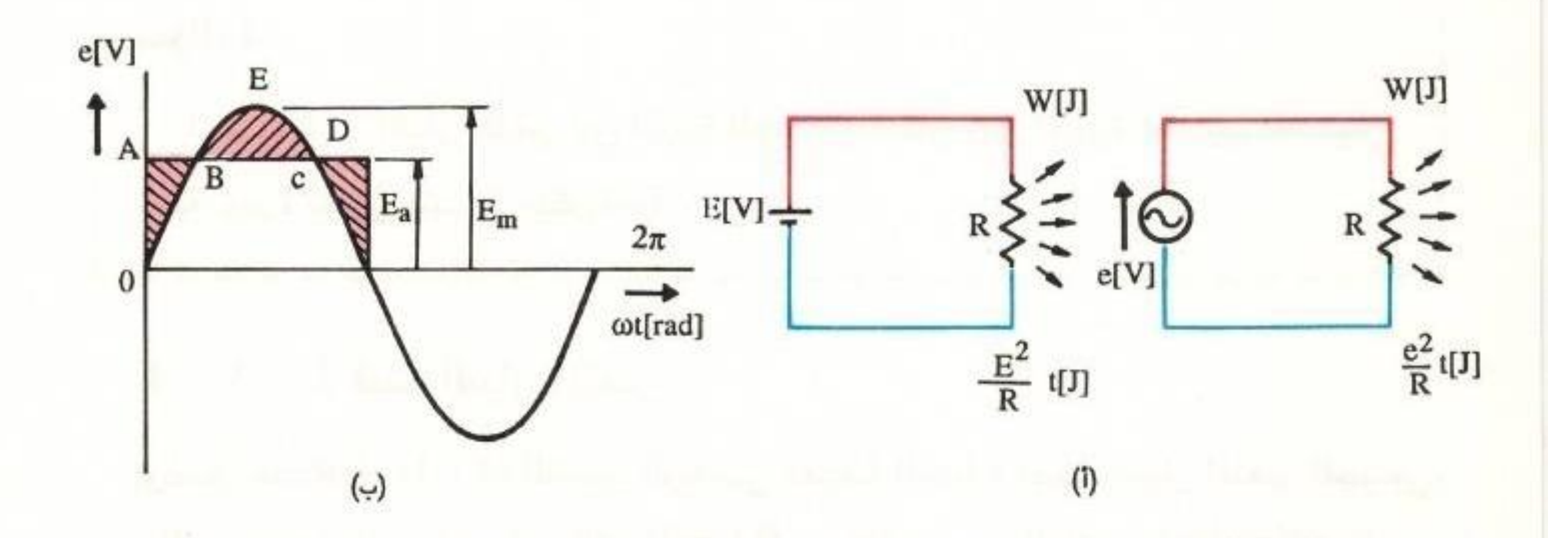
$$e = E_m \sin\theta = E_m \sin\omega t = E_m \sin 2\pi ft \quad (V) \qquad (4-7)$$

وفي العادة نعبر عن سعة جهد التيار المتغير بدلالة القيمة الفعالة والقيمة المتوسطة بدلاً من القيمة اللحظية . ويبين الشكل ٤ – ٦ (أ) أن القيمة الفعالة تعبر عن مقدار التيار المستمر الذي يعطي كمية الحرارة نفسها (بالجول) عند مروره في المقاومة نفسها خلال المدة الزمنية $T(s)$ مثل التيار المتغير . ويبين الشكل ٤ – ٦ (ب) أن القيمة المتوسطة هى مقدار القيمة اللحظية خلال نصف الدورة الموجبة للتيار المتغير . وتوضح العلاقات الآتية كيفية حساب كل من القيمة الفعالة E والقيمة المتوسطة E_a :

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707\, E_m \ (V), \qquad E_a = \frac{2}{\pi} E_m = 0.637\, E_m (V) \quad (4-8)$$

وبالمثل، فإن العلاقة بين القيمة القصوى I_m والقيمة الفعالة I والقيمة المتوسطة I_a للتيار المتغير هي كالآتى :

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707\, I_m \ (A), \qquad I_a = \frac{2}{\pi} I_m = 0.637\, I_m (A) \quad (4-9)$$



الشكل ٤ – ٦ القيمة الفعالة والقيمة المتوسطة .

ويلاحظ أن الحرارة (مقدرة بالجول) التي تتولد خلال دورة التيار المتغير T (s) تقدر من المعادلة :

$$W = \frac{E^2}{R} T = \int_o^T \frac{e^2}{R} \, dt = \int_o^T \frac{E_m^2}{R} \sin^2 \omega t \, dt = \frac{E_m^2}{R} \int_o^T \sin^2 \omega t \, dt$$

وحل المعادلة هو : $E = E_m / \sqrt{2}$

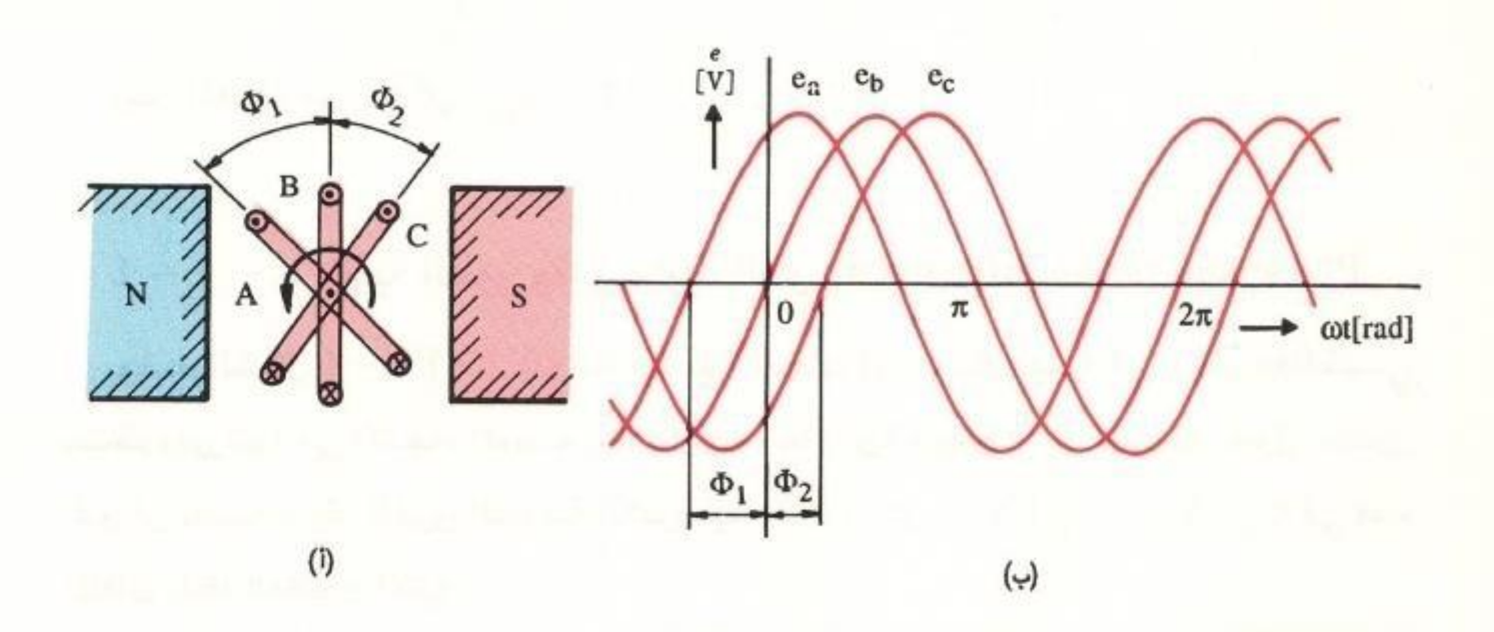
٤ – ١ – ٥ زاوية الطور وفرق زاوية الطور Phase and phase difference

يوضح الشكل ٤ – ٧ (أ) أنه عند وضع 3 ملفات لها الشكل نفسه في مجال مغناطيسي منتظم ودورانها في الاتجاه الموضح بالشكل بسرعة زاوية قيمتها ω (rad/s) حول محور الدوران نفسه تتولد القوى الدافعة الكهربائية e_a (V) , e_b (V) , e_c (V) في هذه الملفات طبقًا للعلاقات الآتية :

$$\left.\begin{aligned} e_a &= \sqrt{2}\ E \sin(\omega t + \Phi_1) \quad (V) \\ e_b &= \sqrt{2}\ E \sin \omega t \quad (V) \\ e_c &= \sqrt{2}\ E \sin(\omega t - \Phi_2) \quad (V) \end{aligned}\right\} (4-10)$$

ويوضح الشكل ٤–٧ (ب) شكل الموجة لكل قوة دافعة كهربائية . وزاوية طور كل من هذه القوى الدافعة الكهربائية للتيار المتغير الجيبى هي $(\omega t + \Phi_1),(\omega t),(\omega t - \Phi_2)$ على الترتيب . وزاوية الطور الابتدائية عند $t = 0$ هي Φ_1 , 0 , $-\Phi_2$ على الترتيب . والفرق بين الزاوية الابتدائية لكل قوة دافعة كهربائية يسمى فرق زاوية الطور . فمثلا فرق زاوية الطور في e_b ، e_a هو $\Phi = \Phi_1 - 0 = \Phi_1 > 0$ أى أن e_a تتقدم على e_b بمقدار Φ_1 (rad) في زاوية الطور . ويبين الشكل ٤ – ٧ (ب) أن فرق زاوية الطور بين e_b ، e_c هو $\Phi = (-\Phi_2) - 0 = -\Phi_2 < 0$. أي إن e_c تتأخر عن e_b بمقدار Φ_2 (rad) في زاوية الطور .

ويبين الشكل ٤ – ٧ (ب) أن فرق الشكل الموجى للجهد e_c عن الشكل الموجى للجهد e_b في الاتجاه الموجب هو $\Phi_2(rad)$. إذا أصبح فرق زاوية الطور بين الشكلين الموجيين يساوي صفراً $\Phi = 0$ فإنهما يكونان في الطور نفسه.



الشكل ٤ – ٧ زاوية الطور وفرق زاوية الطور .

سؤال ٥

عندما تكون المعادلات الخاصة بقوتين دافعتين كهربائيتين هى كما يلى :

$$e_a = 100\sqrt{2}\,\sin \omega t\ (V)\ ,\ e_b = 100\sqrt{2}\,\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right)\ (V),\ f = 50\ Hz$$

احسب :

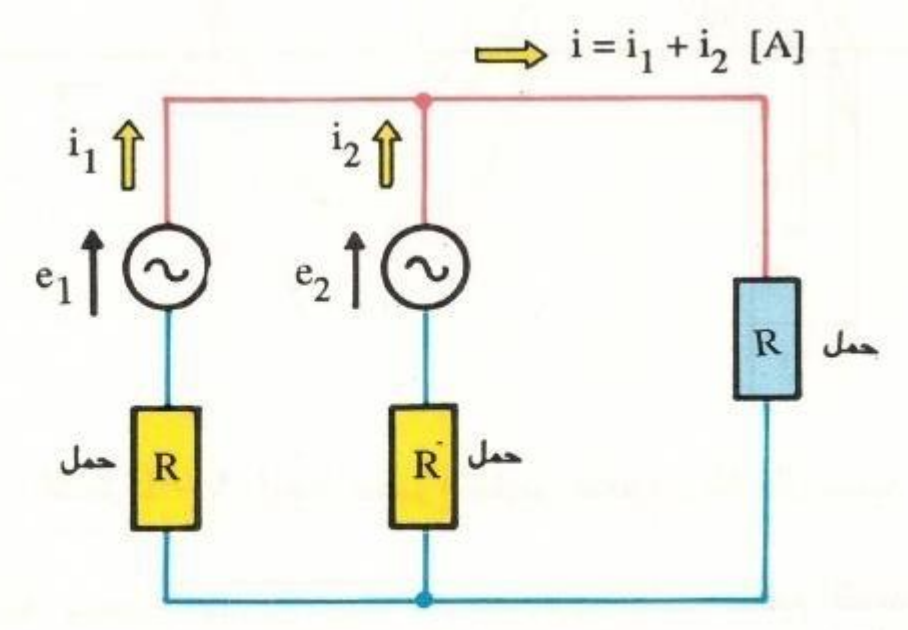
١ – القيمة اللحظية لكل منهما عند $(t = 5\ ms)$.

٢ – القيمة القصوى و القيمة الفعالة و القيمة المتوسطة للجهد e_a .

٣ – زاوية الطور الابتدائية لكل منهما وفرق زاوية الطور بينهما .

٤ – ١ – ٦ تجميع التيارات المتغيرة ذات الموجة الجيبية

عند اضافة أكثر من إشارة للتيار المتغير ذي الموجة الجيبية يمكننا إيجاد مجموعها باستخدام الرسم البياني أو بعمل معادلة للحسابات والمتجهات . ويبين الشكل ٤ – ٨ التيار (i) الناتج من جمع تيارين متغيرين (i_2 , i_1) وإمرار المجموع خلال الحمل .



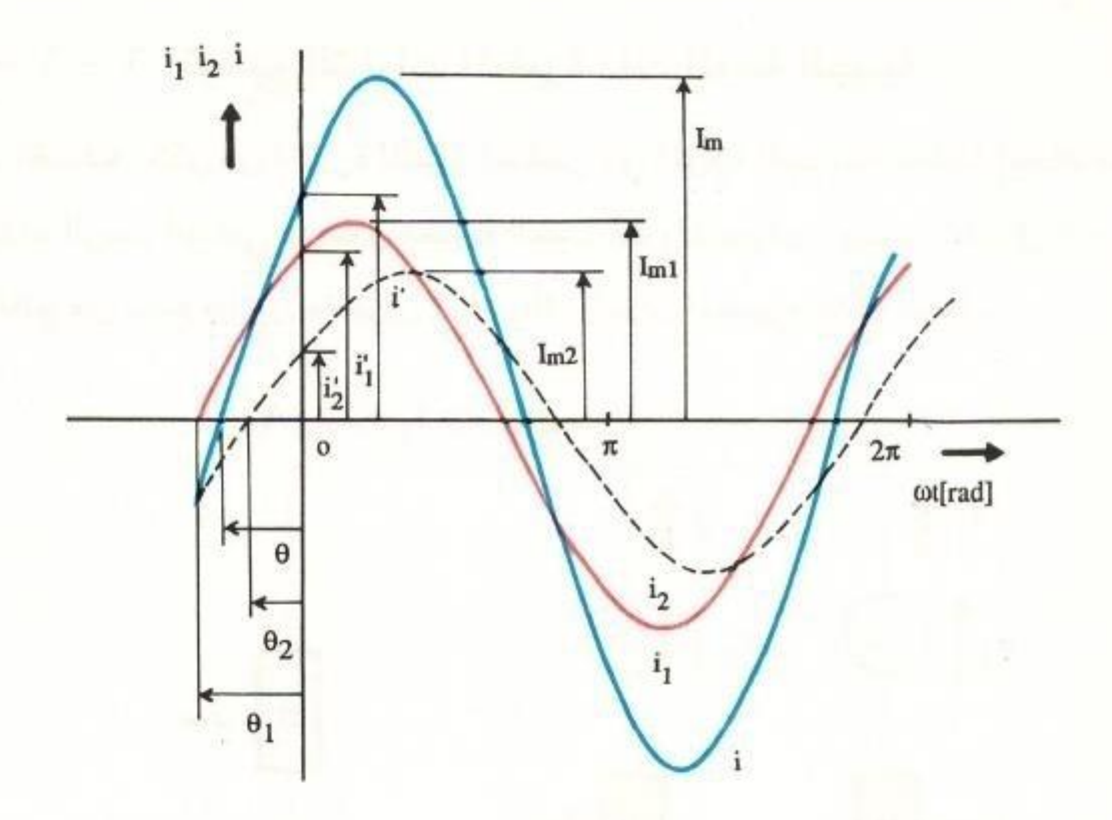
الشكل ٤ – ٨ تجميع التيارات المتغيرة ذات الموجة الجيبية AC

ويبين الشكل ٤ – ٩ تيارين متغيرين ذوي الموجة الجيبية (i_2 , i_1) وعن طريق الرسم البيانى يتم إيجاد مجموعهما (i) بتجميع القيم اللحظية لكل منهما عند كل لحظة زمنية . وتبين النتيجة أن التردد الدائرى ω للتيار الناتج يساوى التردد الدائرى لكل من التيارين (i_2 , i_1).

$$i_1 = I_{m1} \sin(\omega t + \theta_1) \qquad (4-11)$$

$$i_2 = I_{m2} \sin(\omega t + \theta_2) \qquad (4-12)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \theta) \qquad (4-13)$$



الشكل ٤ – ٩ إيجاد مجموع تيارين متغيرين بأشكال جيبية .

ويمكن إيجاد مجموع التيارين باستخدام المعادلات الخاصة بالقيم اللحظية كالآتى:

نفترض أن التيار i_1 (A) والتيار i_2 (A) يمران خلال الحمل نفسه والقيمة اللحظية لكل منهما معطاة بالمعادلات (11 - 4) , (12 - 4) . وبجمع هاتين المعادلتين نحصل على معادلة للقيمة اللحظية للتيار الناتج :

$$i = i_1 + i_2 = I_{m1} \text{ Sin} (\omega t + \theta_1) + I_{m2} \text{ Sin} (\omega t + \theta_2)$$

$$= I_{m1} (\text{Sin } \omega t \text{ Cos } \theta_1 + \text{Cos } \omega t \text{ Sin } \theta_1) + I_{m2} (\text{Sin } \omega t \text{ Cos } \theta_2 + \text{Cos } \omega t \text{ Sin } \theta_2)$$

$$= (I_{m1} \text{ Cos } \theta_1 + I_{m2} \text{ Cos } \theta_2) \text{ Sin } \omega t + (I_{m1} \text{ Sin } \theta_1 + I_{m2} \text{ Sin } \theta_2) \text{ Cos } \omega t$$

نفترض أن $A = I_{m1} \text{ Cos } \theta_1 + I_{m2} \text{ Cos } \theta_2 \ , \ B = I_{m1} \text{ Sin } \theta_1 + I_{m2} \text{ Sin } \theta_2$

$$i = \sqrt{A^2 + B^2} \left[\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} \text{ Sin } \omega t + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \text{ Cos } \omega t \right]$$

$$i = I_m (\cos\theta \sin\omega t + \sin\theta \cos\omega t) = I_m \sin (\omega t + \theta) \qquad (4 - 14)$$

$$I_m = \sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{(I_{m1} \cos\theta_1 + I_{m2} \cos\theta_2)^2 + (I_{m1} \sin\theta_1 + I_{m2} \sin\theta_2)^2}$$

$$= \sqrt{I_{m1}^2 + I_{m2}^2 + 2 I_{m1} I_{m2} \cos(\theta_1 - \theta_2)}$$

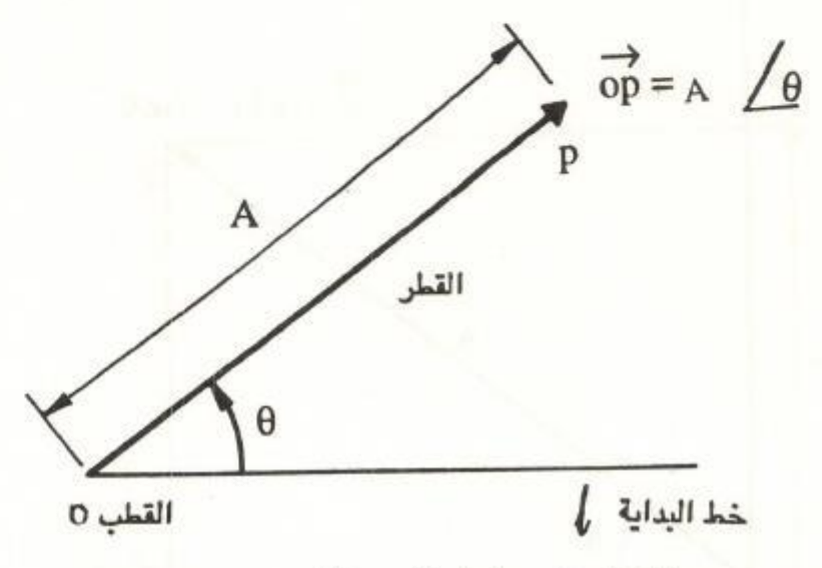
$$\tan\theta = \frac{B}{A} = \frac{I_{m1} \sin\theta_1 + I_{m2} \sin\theta_2}{I_{m1} \cos\theta_1 + I_{m2} \cos\theta_2}$$

ومن المعادلة (14 - 4) نجد أن التيار $i\ \{A\}$ الناتج من تجميع التيارين الجيبيين $i_1(A)$, $i_2(A)$ وكل منهما له التردد الدائرى نفسه $\omega(rad/s)$ يكون له شكل موجي جيبي وله تردد دائرى يساوى التردد الدائري لكل من التيارين على الرغم من اختلاف زاوية الوجه الابتدائية لكل منهما .

أ - المتجه Vector

هناك عدة متغيرات - مثل الزمن والكتلة والحجم ودرجة الحرارة - لها قيمة فقط وتسمى كميات قياسية ؛ وفى مقابل ذلك هناك أيضاً كميات مثل القوة والسرعة وشدة المجال الكهربائي وشدة المجال المغناطيسي لها اتجاه بالإضافة إلى أن لها قيمة وتسمى بكميات اتجاهية .

ويعامل تيار وجهد الموجة الجيبية معاملة المتجهات ومعاملة الأرقام المركبة التخيلية وفي هذا الجزء نقوم بدراسة خواص المتجهات .



الشكل ٤ – ١١ الإحداثيات القطبية

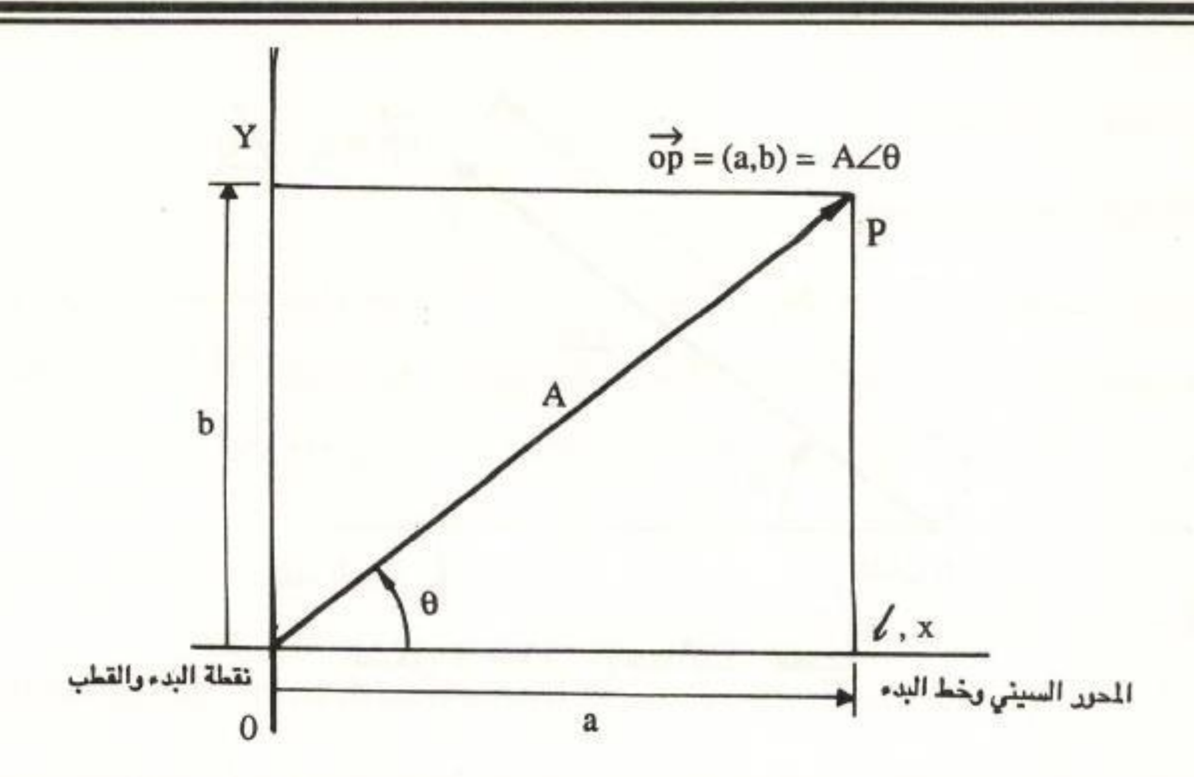
يلاحظ أنه إذا كان $(\tan\ \theta > 0)$ فليس من الضرورى أن تقع الزاوية (θ) في الربع الأول . وإذا كان $(A < 0)$ وكان $(B < 0)$ فإن الزاوية (θ) تقع في الربع الثالث . ويتحدد الربع الذى تقع فيه الزاوية (θ) باشارات A , B .

والاحداثى السيني للمتجه OP هو (a) والإحداثى الصادي هو (b) .

ويتضح من الشكل ٤ – ١١ أن الإحداثيات القطبية تمكننا من تمثيل المتجه OP برسم خط طوله يساوى قيمة المتجه، وزاويته (θ) ومقاسه في عكس اتجاه عقارب الساعة من خط البـدء . وفى هذا الكتاب نعبر عن الإحداثيات القطبية لهذا المتجه كالآتي: $A \angle\theta$.

ويبين الشكل ٤ – ١٢ العلاقة بين الإحداثيات المتعامدة والإحداثيات القطبية للمتجه OP ويتضح ذلك في المعادلة (15 - 4) . وعلى العكس إذا كانت العلاقة بين الإحداثيات المتعامدة لمتجه والإحداثيات القطبية لمتجه آخر هى كما في المعادلة (15- 4) فإن المتجهين يتطابقان .

$$\left.\begin{aligned} &a = A \cos\theta \quad , \; b = A \sin\theta \\ &A = \sqrt{a^2 + b^2} \quad , \; \tan\theta = \frac{b}{a} \end{aligned}\right\} \quad (4 - 15)$$

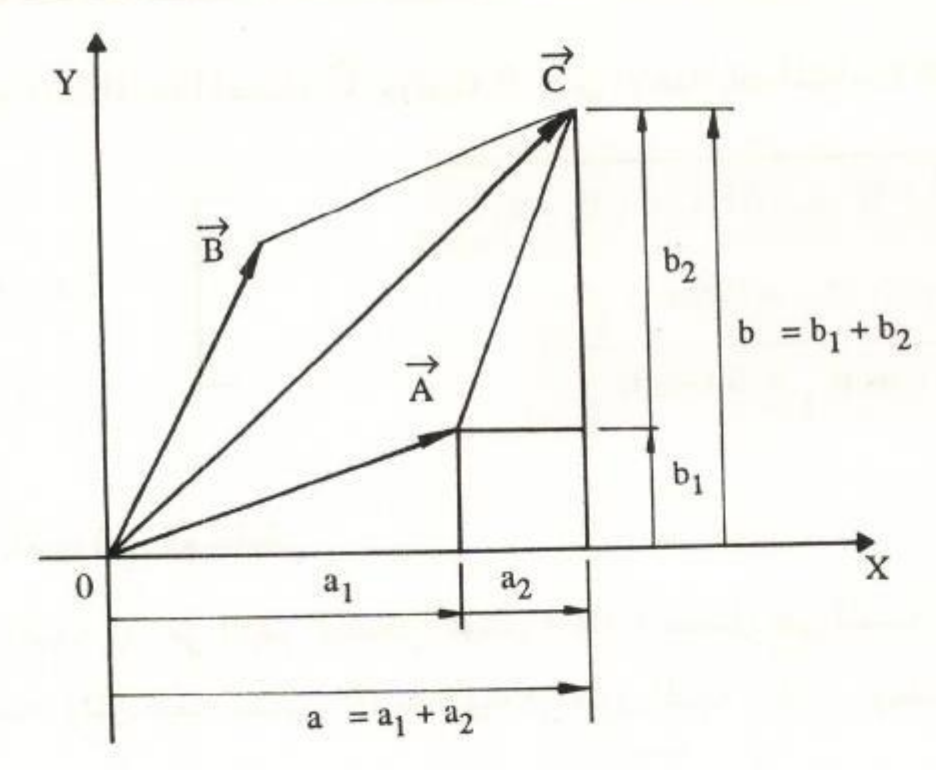


الشكل ٤ – ١٢ العلاقة بين الإحداثيات المتعامدة والإحداثيات القطبية

حـ – جمع المتجهات

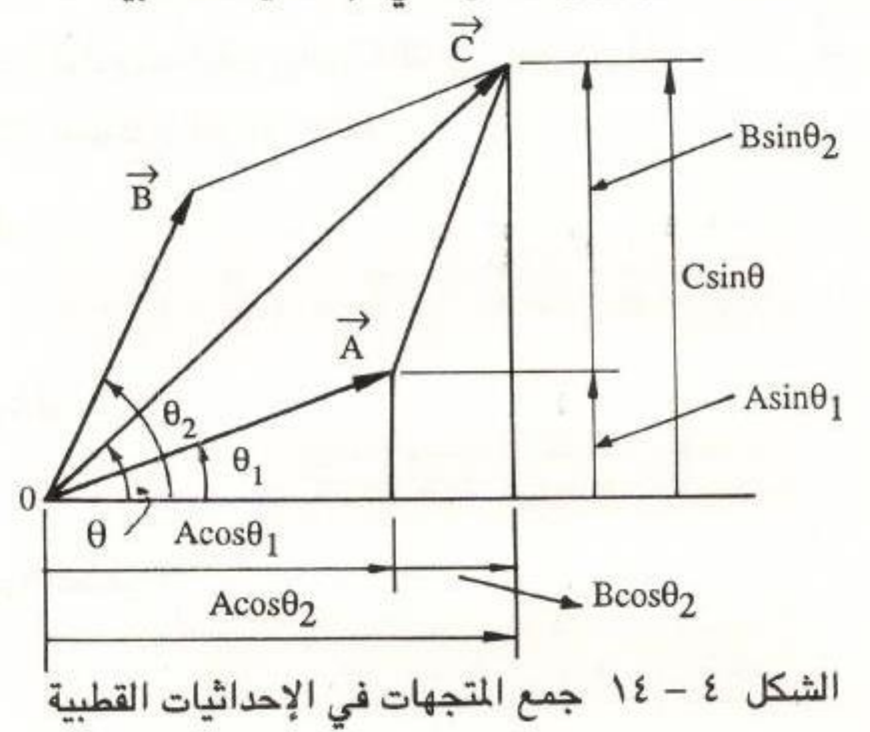
عند جمع المتجه $\vec{A} = (a_1, b_1)$ والمتجه $\vec{B} = (a_2, b_2)$ نحصل على المتجه $\vec{C} = (a, b)$ والمتجه المحصلة $\vec{C}$ هو القطر لمتوازي الأضلاع المار بنقطة الأصل (O) والذى جانباه هما $\vec{A}$, $\vec{B}$.كما هو مبين بالشكل ٤ – ١٣ . ويمكن إيجاد قيمة الإحداثى السينى (a) والإحداثى الصادي (b) للمتجه المحصلة $\vec{C}$ بجمع الإحداثيات السينية للمتجهات $\vec{A}$, $\vec{B}$ وجمع الإحداثيات الصادية للمتجهات $\vec{A}$, $\vec{B}$ على الترتيب كمايلي :

$$a = a_1 + a_2 , \quad b = b_1 + b_2 \qquad (4-16)$$



الشكل ٤ – ١٣ جمع المتجهات في الإحداثيات المتعامدة

ويبين الشكل ٤ – ١٤ كيفية جمع المتجهات $\vec{A} = A \angle \theta_1$, $\vec{B} = B \angle \theta_2$ للحصول على المتجه المحصلة $\vec{C} = C \angle \theta$ في الإحداثيات القطبية .



الشكل ٤ – ١٤ جمع المتجهات في الإحداثيات القطبية

ويمكن إيجاد قيمة المتجه المحصلة C وزاويته θ مـن الإحداثيات المتعامدة كمايلى :

$$C = \sqrt{A^2 + B^2 + 2\,AB\,\mathrm{Cos}\,(\theta_1 - \theta_2)}$$

$$\tan\theta = \frac{A\,\mathrm{Sin}\,\theta_1 + B\,\mathrm{Sin}\,\theta_2}{A\,\mathrm{Cos}\,\theta_1 + B\,\mathrm{Cos}\,\theta_2} \qquad (4-17)$$

د - ضرب المتجه في رقم حقيقى

عند ضرب المتجه $\vec{A}$ فى الرقم الحقيقى الموجب (m) نحصل على المتجه $\overrightarrow{mA}$ الذى له اتجاه $\vec{A}$ نفسه، ولكن قيمته تساوي m مضروبة في طول المتجه $\vec{A}$. وعند ضرب المتجه $\vec{A}$ في الرقم الحقيقي السالب (m -) نحصل على المتجه $\overrightarrow{-mA}$ ويكون اتجاهه عكس اتجاه $\vec{A}$ وقيمته تساوي m مضروبة في طول المتجه $\vec{A}$.

هـ - قوانين عمليات المتجهات

تحكم المتجهات قوانين عمليات بيانها كالتالى : لنفرض أن $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$ هى ثلاثة متجهات، اذن يمكن استنتاج القوانين الآتية :

قانون الترافق

$$(\vec{A} + \vec{B}) + \vec{C} = \vec{A} + (\vec{B} + \vec{C})$$

قانون الاستبدال

$$\vec{A} + \vec{B} = \vec{B} + \vec{A}$$

($\vec{O}$ هو متجهة الصفر)

$$\vec{O} + \vec{A} = \vec{A} + \vec{O} = \vec{A}$$

$$(-\vec{A}) + \vec{A} = \vec{A} + (-\vec{A}) = \vec{o}$$

وتنطبق قوانين العمليات الآتية على ضرب المتجه في الأرقام الحقيقية (m , n) .

قانون الترافق

$$(mn)\ \vec{A} = m\ (n\ \vec{A})$$

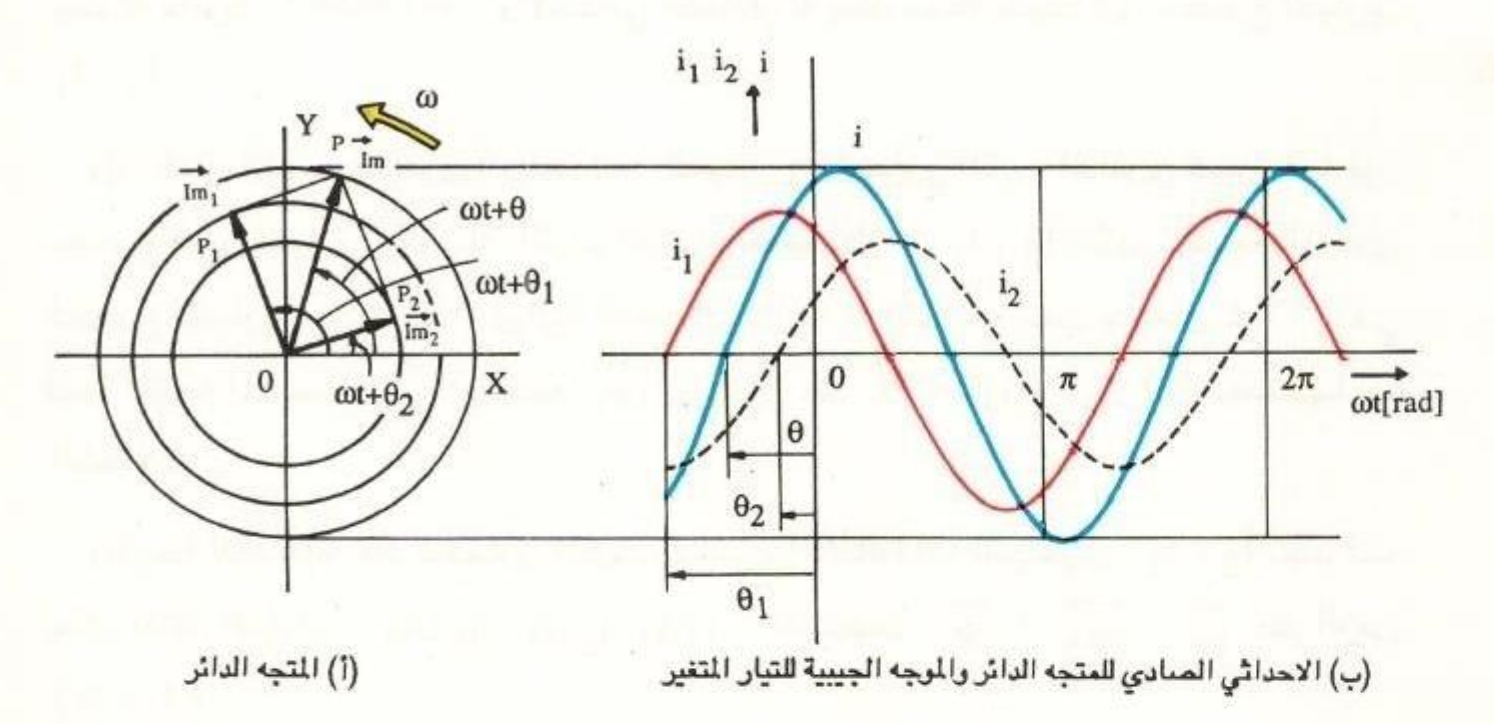
قانون التوزيع

$$m\ (\vec{A} + \vec{B}) = m\ \vec{A} + m\ \vec{B}$$

$$(m+n)\ \vec{A} = m\ \vec{A} + n\ \vec{A}$$

ايجاد قيمة مجموع تيارين باستخدام المتجهات

كما في الشكل ٤ – ١٥ (أ) نفرض أن المتجه $\overrightarrow{OP_1}$ في الإحداثيات المتعامدة يدور حول نقطة الأصل بسرعة دائرية قيمتها $\omega(rad/s)$.



الشكل ٤ – ١٥ العلاقة بين الموجة الجيبية للتيار المتغير والمتجه

نفترض أن قيمة المتجه $\overrightarrow{OP_1}$ هى أقصى قيمة I_{m1} (A) للتيار المتغير I_1(A) ذي الموجة الجيبية، وأن الزاوية التي يصنعها $\overrightarrow{OP_1}$ مع $\overrightarrow{Ox}$ هى زاوية الطور الابتدائية θ_1 عند الزمن $t = o$ فيكون الإحداثي الصادي للمتغير الدائري $\overrightarrow{OP_1}$ هى الموجة الجيبية للتيار المتغير كما في الشكل ٤ – ١٥ .

وبالطريقة نفسها إذا افترضنا أن قيمة المتجه $\overrightarrow{OP_2}$ الذي يدور حول نقطة الأصل (O) بالسرعة الدائرية نفسها (ω (rad/s وبالمثل فإن قيمة المتجه $\overrightarrow{OP_1}$ هي أقصى قيمة I_{m2} (A) للتيار المتغير I_2 (A) ذى الموجة الجيبية نفسها ، وأن الزاوية التي يصنعها $\overrightarrow{OP_2}$ مع $\overrightarrow{Ox}$ هي زاوية الطور الابتدائية θ_2 عند الزمن $t = o$ فيكون الإحداثى الصادى للمتغير الدائري $\overrightarrow{OP_2}$ هي الموجة الجيبية للتيار المتغير .

إذا افترضنا أن المتجه $\overrightarrow{OP}$ هو مجموع المتجهين $\overrightarrow{OP_1}$ ، $\overrightarrow{OP_2}$ فإن الإحداثي الصادي هو مجموع القيم اللحظية لكل من i_1 , i_2 عند أية لحظة . ويدور المتجه $\overrightarrow{OP}$ حول نقطة الأصل بسرعة دائرية (ω (rad/s والإحداثي الصادي له يمثل موجة جيبية هى مجموع التيارين i_1 , i_2 .

وإذا كان التردد الدائرى (ω (rad/s للتيار i_1 يساوي التردد الدائري للتيار i_2 فإن مجموع هذين التيارين يكون له التردد الدائري نفسه لكل من i_1 , i_2 وتكون القيمة القصوى لمجموع التيارين I_m (A) وزاوية الوجه الابتدائية θ (كما هو مبين بالشكل ٤–١٦) هي قيمة المتجه المحصلة $\overrightarrow{OP}$ (جمع $\overrightarrow{OP_1}$ ، $\overrightarrow{OP_2}$ عند $t = o$) والزاوية التى يصنعها مع الخط OX .

ونتيجة لذلك فإنه عند تساوى التردد الدائرىω(rad/s) للتيارين i_1 , i_2 نجد أنه يمكن تمثيل التيارات i (A) , i_2 (A) , i_1 (A) بالمتجهات $\overrightarrow{OP_1}$ ، $\overrightarrow{OP_2}$ ، $\overrightarrow{OP}$ عند الزمن ($t = o$) .

سؤال٦

اذا كان $i_1 = 10\sqrt{2}\,\sin \omega t(A)$ ، $i_2 = 10\sqrt{2}\,\sin (\omega t + \frac{\pi}{3})(A)$

ارسم الأشكال الموجية لقيم ωt الواقعة بين صفر و $2\pi\ \{rad\}$.

احسب مجموع التيارين $(i = i_1 + i_2)$ باستخدام الرسم البياني ومعادلة القيمة اللحظية و جمع المتجهات .

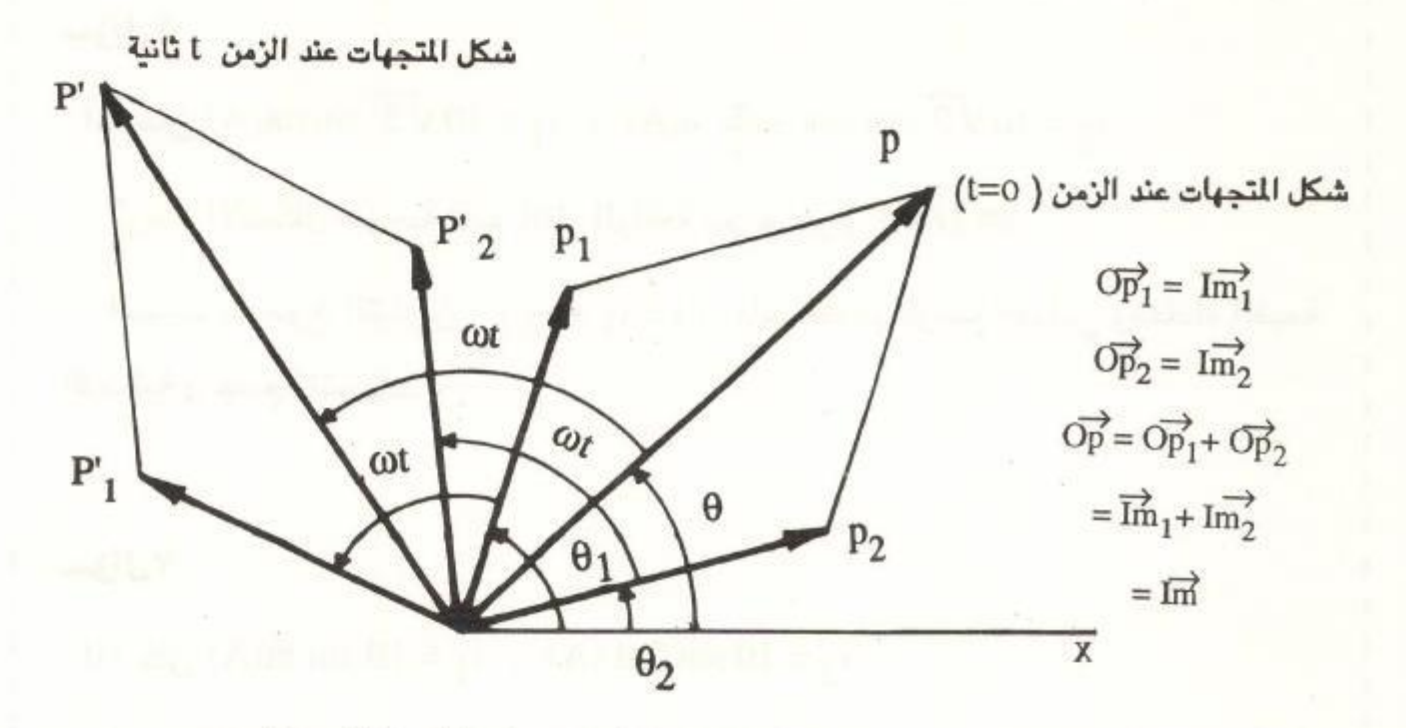
سؤال٧

اذا كان $i_1 = 10 \sin \pi t(A)$ ، $i_2 = 10 \sin 2\pi t\ (A)$

ارسم الأشكال الموجية الجيبية لقيم t الواقعة بين صفر و(s) 2 . إحسب كل تردد دائرى . ارسم الأشكال الموجية لمجموع التيارين $i = i_1 + i_2\ (A)$. هل هذا الشكل له موجة جيبية ؟ .

من نتائج سؤال ٧ نجد أن جمع الموجات الجيبية ذات الترددات الدائرية المختلفة لايعطي موجات جيبية . أي إن مجموع التيارين لايمكن حسابه باستخدام المتجهات . ولهذا يتم حساب مجموع التيارين باستخدام الرسم البياني أو معادلة القيمة اللحظية .

ويمكن استخدام كل الطرق السابق شرحها لايجاد مجموع تيارين أو لإيجاد مجموع جهدين .



الشكل ٤ – ١٦ جمع التيارات المتغيرة ذات الموجة الجيبية

باستخدام مجموع المتجهات .

٤ – ٢ الأعداد المركبة Complex numbers

على أساس التردد الدائرى نفسه ؛ يمكن ايجاد مجموع التيارات أو مجموع الجهود المتغيرة ذات الموجة الجيبية بسهولة إذا عبرنا عنها في صورة كمية اتجاهية .

في حسابات دائرة التيار المتغير نتعامل كثيراً مع حاصل ضرب وخارج قسمة الجهود أو التيارات ، ولهذا فإن استخدام خواص المتجهات لإيجاد مجموع التيارات أو الجهود يعدّ غير كاف . وحيث أن الأرقام المركبة التخيلية لها خواص شبيهة بالمتجهات، لذا يمكن استخدامها لتمثيل التيار المتغير ذي الموجة الجيبية . أضف إلى ذلك أنه يمكن استخدام عمليات الضرب والقسمة مع الأرقام المركبة التخيلية ويمكن تطبيق ذلك في دائرة التيار المتغير .

في هذا الجزء سنقوم بدراسة الأعداد المركبة التخيلية وخواصها المشابهة لخواص المتجهات.

٤ – ٢ – ١ العدد المركب وخواصه

أ – العدد المركب التخيلى Imaginary units

اذا افترضنا أن (a) هو عدد حقيقى اختياري . وإذا كانت (a) تحقق العلاقة ($a^2 < 0$) فإن (a) في هذا الحالة ليست عدداً حقيقياً. فمثلاً اذا كانت (a) هى الجذر التربيعى لـ (-1) أى ($\sqrt{-1}$) فإن (a) ليست عددا حقيقيًا ولكنها تسمى في هذه الحالة الوحدة التخيلية، ونرمز لها بالرمز (j) . في بعض كتب الرياضيات يرمز لها بالرمز (i) أما في كتب الهندسة الالكترونية فيستخدم الرمز (j) حتى لايتعارض مع رمز التيار (i) ومن تعريف الوحدة التخيلية نجد أن :

$$j^2 = -1 \qquad (4-18)$$

ويمثل العدد المركب في صورة (a + jb) حيث b , a أعداد حقيقية إختيارية و (j) هى الوحدة التخيلية . ويمكن إضافة (a + jb) إلى مجموعة الأعداد .

ب – خواص العدد المركب

١ – العدد المركب (a + jb) يساوى صفر فقط في حالة (a = b=0) ويعبر عن ذلك كالآتى $a + jb = 0$.

٢ – العددان المركبان (a +jb) ,(c + jd) يتساويان فقط في حالة (a=c , b = d) ويعبر عن ذلك كالآتى $a + jb = c + jd$.

٣ – في العدد المركب (a + jb) إذا كان (b = 0) يصبح العدد حقيقياً وإذا كان (a = 0) يصبح العدد رقماً تخيلياً خالصاً (jb) .

ويمكن التعبير عن الجذر التربيعي للأعداد السالبة بدلالة الوحدة التخيلية (j) كالآتى :

$$\sqrt{-2} = j\sqrt{2} \quad , \quad \sqrt{-4} = j2 \quad , \quad -\sqrt{-9} = -j3$$

يضاف إلى ذلك أن الوحدة التخيلية (j) لها الخواص الآتيـة :

$$j^3 = j^2 . j = -j \ , \ j^4 = j^2 . j^2 = 1 \ , \ j^5 = j^4 . j = j$$

$$\frac{1}{j} = \frac{-j}{j.(-j)} = -j \ , \ \frac{1}{-j} = \frac{j}{-j.j} = j$$

حـ - استخدام قواعد الحساب الأساسية الأربع مع الأعداد المركبة

يمكن استخدام قواعد الحساب الأساسية الأربع الخاصة بالأعداد الحقيقية مع الأعداد المركبة كما هي ومعامله (j) كحرف ، واستبدال (j^2) بـ -1 . وعند استخدام هذه القواعد مع الأعداد المركبة فإنها تكون كالتالى :

الجمع : $(a + jb) + (c + jd) = (a + c) + j(b + d)$

الطرح : $(a + jb) - (c + jd) = (a - c) + j(b - d)$

الضرب : $(a + jb)(c + jd) = ac + jad + jbc + j^2 bd$

$$= (ac - bd) + j(ad + bc)$$

القسمة : $\frac{a + jb}{c + jd} = \frac{(a + jb)(c - jd)}{(c + jd)(c - jd)} = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + j\frac{bc - ad}{c^2 + d^2} \ (c \neq o, d \neq o)$

ويمكن التعبير عن العدد المركب z كمايلى :

$$\dot{z} = a + jb \qquad (4 - 19)$$

فى المعادلة (19 - 4) الجزء الحقيـقى من ($\dot{z}$) هـو (a) والجزء التخيلى من $\dot{z}$ هو (b) والعدد المركب $\bar{\dot{z}}$ القرين لـ $\dot{z}$ هو :

$$\bar{\dot{z}} = a - jb$$

وأثناء القسمة نقوم بضرب كل من البسط والمقام في العدد المركب القرين للمقام لكي يصبح المقام عدداً حقيقياً .

سؤال٨

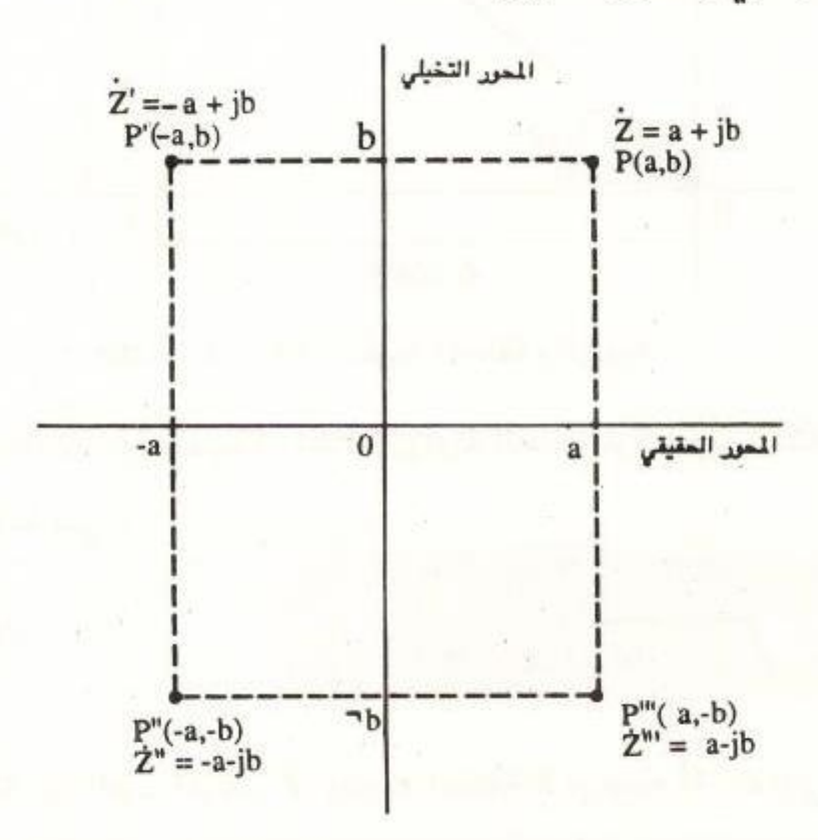
احسب ما يلى :

1- $(9+j8)+(4-j4)$ 2- $(9-j8)-(3+j2)$

3- $(4-j6)(6+j8)$ 4- $\frac{4-j3}{3+j4}$

د – المستوى المركب Complex plane

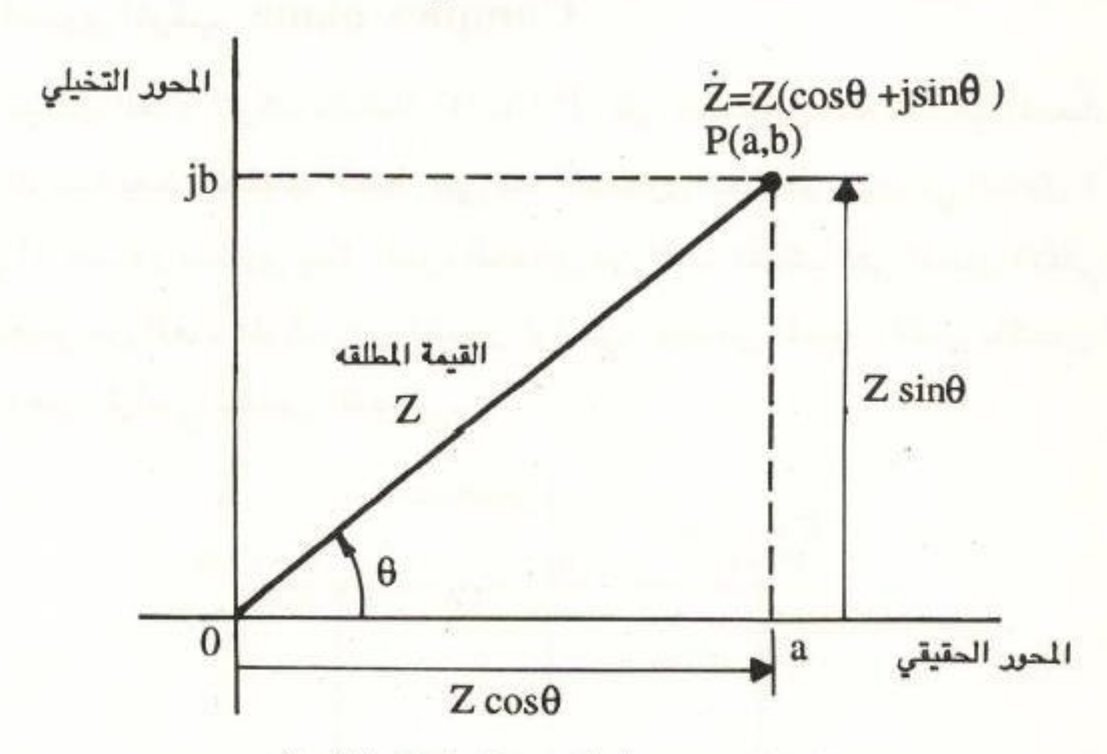
يمكن تمثيل العدد المركب بالنقطة $P(a, b)$ على مستوى الإحداثيات المتعامدة وكل الاعداد المركبة يمكن تمثيلها كنقط على هذا المستوى كما هو مبين في الشكل ٤ – ١٧ . والمستوى المركب هو مستوى يمثل الجزء الحقيقى من العدد المركب على المحور الأفقي، ويمثل الجزء التخيلى من العدد المركب على المحور الرأسي، ويسمى المحور الأفقي بالمحور الحقيقي ويسمى المحور الرأسي بالمحور التخيلى .



الشكل ٤ – ١٧، العدد المركب والمستوى المركب

هـ - القيمة المطلقة والزاوية Absolute value and argument

فى الشكل ٤ - ١٨ نجد أن القيمة المطلقة للعدد المركب $\dot{z}$ هى طول الخط المستقيم op بين نقطة الأصل o والنقطة p التي تمثل العدد المركب ، ونعبر عنها بالرمز $|\dot{z}|$. أما زاوية العدد المركب فهى الزاوية θ التى يصنعها $\overline{op}$ مع المحور الحقيقى والاتجاه الموجب لقياسها هو عكس اتجاه عقارب الساعة ابتداء من المحور الحقيقي .



الشكل ٤ - ١٨ القيمة المطلقة والزاوية

ويمكننا كتابة العلاقات بين القيمة المطلقة وزاوية العدد المركب وبين الأجزاء الحقيقية والتخيلية لهذا العدد كما يلي :

$$a = z \operatorname{Cos} \theta \quad , \quad b = z \operatorname{Sin} \theta$$
$$z = \sqrt{a^2 + b^2} \qquad \tan \theta = b / a \qquad (4 - 20)$$

ويمكن كتابة العلاقة بين العدد المركب $\dot{z}$ وقيمته المطلقة z وزاويته θ كمايلي :

$$\dot{z} = z \operatorname{Cos} \theta + j z \operatorname{Sin} \theta = z(\operatorname{Cos} \theta + j \operatorname{Sin} \theta) \qquad (4 - 21)$$

وباستخدام علاقة أويلر (22 - 4) يمكن كتابة العدد المركب $\dot{z}$ في صورة المعادلة (23 - 4) .

$$\in^{j\theta} = \text{Cos}\,\theta + j\,\text{Sin}\,\theta \qquad (4-22)$$

$$\dot{z} = z\in^{j\theta} \qquad (4-23)$$

والرمز (∈) يعبر عن قاعدة اللوغاريتم الطبيعى , في كتب الرياضيات يستخدم الرمز (e) لهذه القاعدة . أما في كتب الهندسة الإلكترونية فيستخدم الرمز(∈) حتى لايتعارض مع (e) الذي يستخدم رمزًا للقيمة اللحظية للقوة الدافعة الكهربائية.

كما يمكن كتابة العدد المركب $\dot{z}$ كمايلي :

$$\dot{z} = z\angle\theta$$

نستنتج مما سبق أن العدد المركب $\dot{Z}$ يمكن كتابته في أى من الصور الآتية : $(a+jb)$ حيث الاحداثيات المتعامدة $(a\,,\,b)$.

و $z\,(\text{Cos}\,\theta + j\sin\theta)$ حيث الدوال المثلثية في الاحداثيات القطبية $(z\,,\,\theta)$.

مثال ١

احسب القيمة المطلقة والزاوية للعدد المركب $\dot{z} = 3 + j\sqrt{3}$

اكتب هذا العدد المركب في صورة الدوال المثلثية وفى صورة الدالة الأسية $z\in^{j\theta}$

وارسم هذا العدد كنقطة على المستوى المركب .

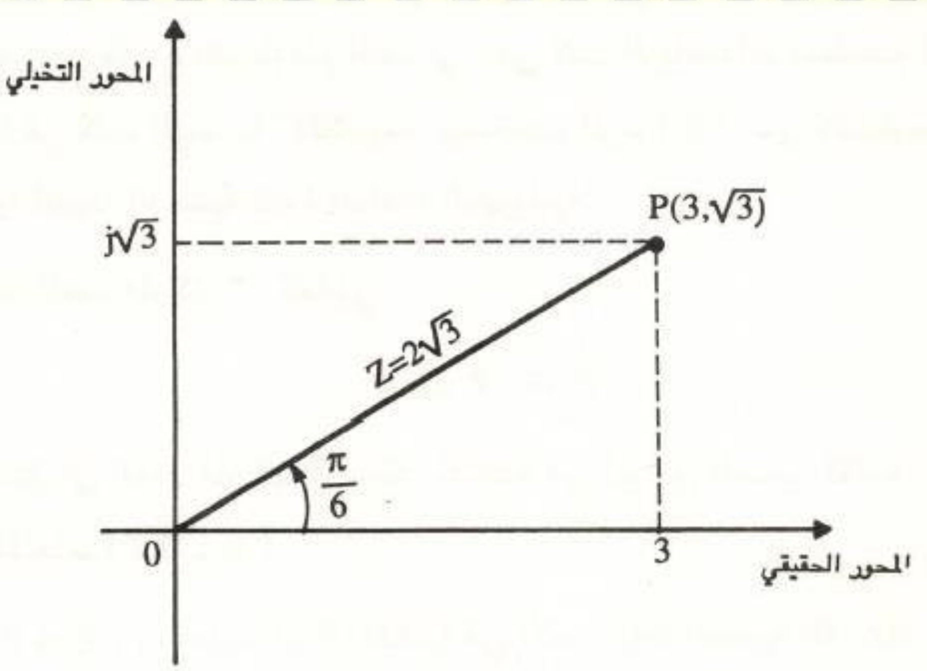
الحل

$$z = |\dot{z}| = \sqrt{(3)^2 + (\sqrt{3})^2} = \sqrt{12} = 2\sqrt{3}$$

$$\tan\theta = \frac{\sqrt{3}}{3} = \frac{1}{\sqrt{3}} \longrightarrow \theta = \frac{\pi}{6}\,\text{rad} = 30^{o}$$

$$\dot{z} = 2\sqrt{3}\ \left(\text{Cos}\,\frac{\pi}{6} + j\,\text{Sin}\,\frac{\pi}{6}\right)$$

$$\dot{z} = 2\sqrt{3}\ \in^{j\pi/6}$$



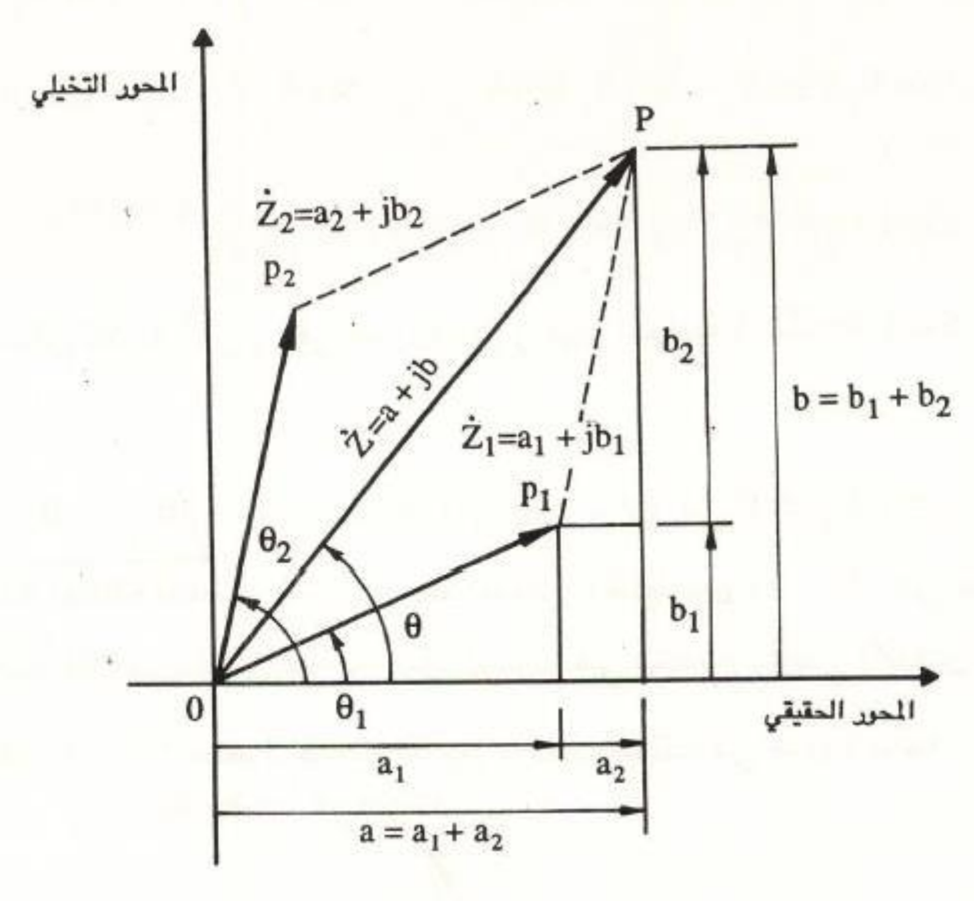
الشكل ٤ – ١٩ موقع النقطة P على المستوى المركب .

و – تمثيل العدد المركب في صورة متجه

يبين الشكل ٤ – ٢٠ تمثيل العدد المركب $(\dot{z}_1 = a_1 + jb_1)$ فى المستوى المركب p_1 ويمثل العدد المركب $(\dot{z}_2 = a_2 + jb_2)$ بالنقطة p_2 . وإذا افترضنا أن العدد المركب $\dot{z}$ هو مجموع العددين $\dot{z}_1 , \dot{z}_2$ ويمثله النقطة P في المستوى المركب فتكون إحداثياته في اتجاه المحور الحقيقي والمحور التخيلي كمايلي :

$$a = a_1 + a_2 , \qquad b = b_1 + b_2$$

ويكون المتجه $\overrightarrow{OP}$ هو مجموع المتجهين $\overrightarrow{op}_1$ و $\overrightarrow{op}_2$ والعدد المركب له كل خواص المتجهات السابق ذكرها . ويبين الشكل ٤-٢٠ أن العدد المركب ($\dot{z} = a + jb$) يمثله المتجه $\overrightarrow{op}$. ويوضع سهم على الخط $\overrightarrow{op}$.



الشكل ٤ – ٢٠ تمثيل العدد المركب في صورة متجه

٤ – ٢ – ٢ حاصل ضرب الاعداد المركبة وخارج قسمتها

أ – حاصل ضرب الاعداد المركبة

نفترض أن العددين المركبين الاختياريين $\dot{z}_1$, $\dot{z}_2$ يمكن تمثيلهما كمايلى :

$$\dot{z}_1 = z_1 \in^{j\theta_1} = z_1 (\text{Cos}\,\theta_1 + j\,\text{Sin}\,\theta_1) \qquad (4-24)$$

$$\dot{z}_2 = z_2 \in^{j\theta_2} = z_2 (\text{Cos}\,\theta_2 + j\,\text{Sin}\,\theta_2) \qquad (4-24)$$

فيمكننا حساب حاصل ضرب العددين $\dot{z}_2$, $\dot{z}_1$ كما يلى :

$$\dot{z} = \dot{z}_1 \dot{z}_2 = z_1 \in^{j\theta_1} . z_2 \in^{j\theta_2} = z_1 (\text{Cos}\,\theta_1 + j\,\text{Sin}\,\theta_1) . z_2 (\text{Cos}\,\theta_2 + j\,\sin\theta_2)$$

$$= z_1 z_2 \{ (\text{Cos}\,\theta_1\,\text{Cos}\,\theta_2 - \text{Sin}\,\theta_1\,\text{Sin}\,\theta_2) + j (\text{Sin}\,\theta_1\,\text{Cos}\,\theta_2 + \text{Cos}\,\theta_1\,\text{Sin}\,\theta_2) \}$$

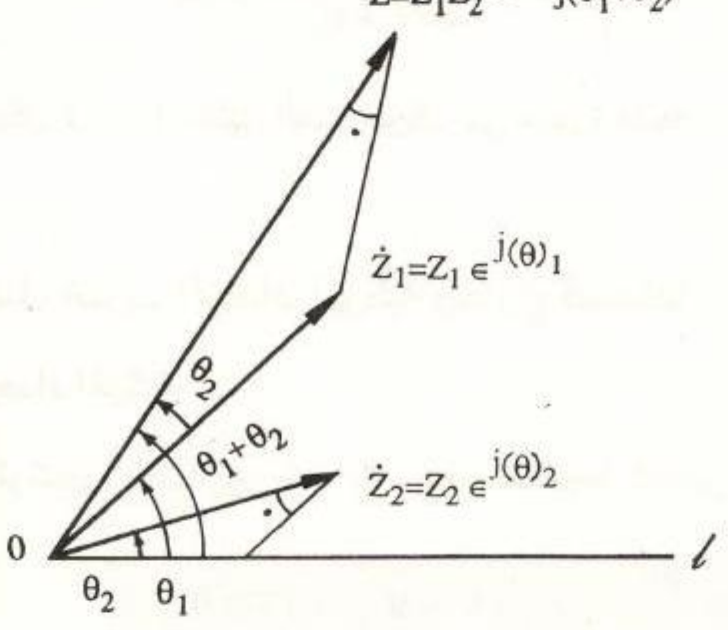
$$\dot{z} = z_1 z_2 \{ \text{Cos}(\theta_1 + \theta_2) + j\,\text{Sin}(\theta_1 + \theta_2) \} = z_1 z_2 \in^{j(\theta_1 + \theta_2)} \qquad (4-25)$$

وحيث أنه يمكن كتابه $z \in^{j\theta}$ في صورة $z\angle\theta$ فإن المعادلة (25–4) يمكن كتابتها في الصورة الآتية :

$$\dot{z}_1 \dot{z}_2 = (z_1 \angle\theta_1)(z_2 \angle\theta_2) = z_1 z_2 \underline{/\theta_1 + \theta_2}$$

أي إن القيمة المطلقة لحاصل ضرب عددين مركبين إختياريين $\dot{z}_2$, $\dot{z}_1$ هي حاصل ضرب القيمتين المطلقتين لكل منهما، وزاوية حاصل الضرب هي مجموع زاويتي العددين المركبين .

ويبين الشكل ٤ – ٢١ حاصل ضرب عددين مركبين وتمثيله في صورة متجه .



الشكل ٤ – ٢١ حاصل ضرب عددين مركبين وتمثيله في صورة متجه .

ب – خارج قسمة عددين مركبين

يمكن إيجاد خارج قسمة عددين مركبين $\dot{z}_2 , \dot{z}_1$ معطيين بالمعادلة (24 – 4) باستخدام العلاقات الآتية :

$$\dot{z} = \frac{\dot{z}_1}{\dot{z}_2} = \frac{z_1 \in^{j\theta_1}}{z_2 \in^{j\theta_2}} = \frac{z_1 (\cos\theta_1 + j\sin\theta_1)}{z_2 (\cos\theta_2 + j\sin\theta_2)} = \frac{z_1}{z_2} \frac{(\cos\theta_1 + j\sin\theta_1)(\cos\theta_2 - j\sin\theta_2)}{\cos^2\theta_2 + \sin^2\theta_2}$$

$$= \frac{z_1}{z_2} \{ (\cos\theta_1 \cos\theta_2 + \sin\theta_1 \sin\theta_2) + j (\sin\theta_1 \cos\theta_2 - \cos\theta_1 \sin\theta_2) \}$$

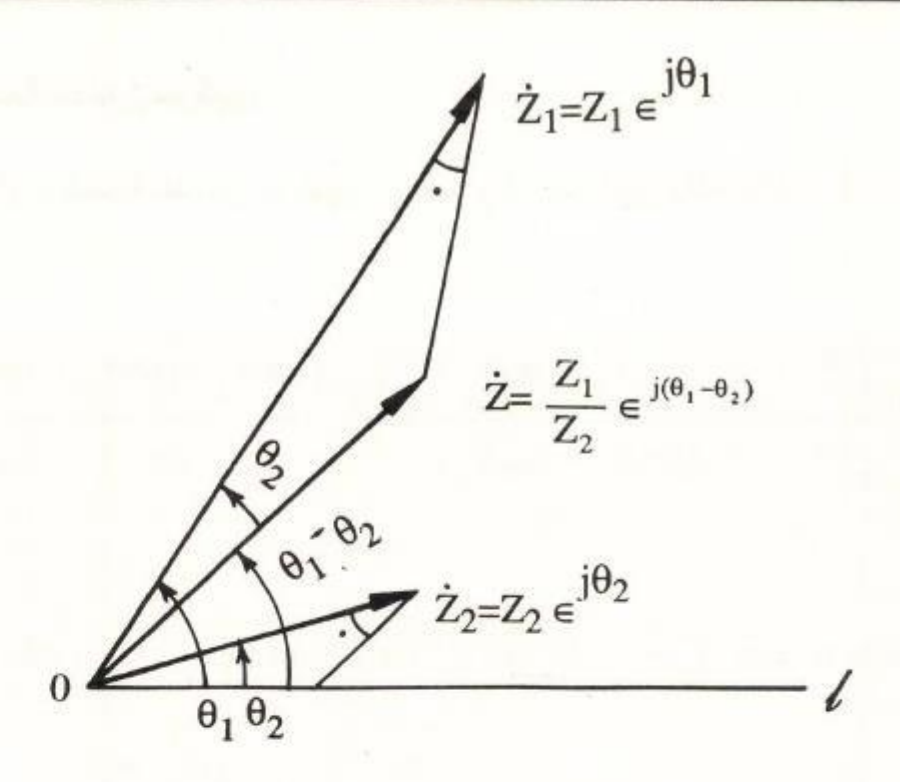
$$= \frac{z_1}{z_2} \{ \cos(\theta_1 - \theta_2) + j \sin(\theta_1 - \theta_2) \} = \frac{z_1}{z_2} \in^{j(\theta_1 - \theta_2)} \qquad (4-26)$$

وإذا كتبنا $z \in^{j\theta}$ في الصورة $z \angle\theta$ فيمكن كتابة المعادلة (26 – 4) كمايلي :

$$\frac{\dot{z}_1}{\dot{z}_2} = \frac{z_1 \angle\theta_1}{z_2 \angle\theta_2} = \frac{z_1}{z_2} \angle \theta_1 - \theta_2$$

إي إن القيمة المطلقة لخارج قسمة عددين مركبين هي خارج قسمة القيم المطلقة للعددين المركبين، وزاوية خارج قسمة عددين مركبين هى الفرق ($\theta_1 - \theta_2$) بين زاويتي العددين المركبين .

ويبين الشكل ٤ – ٢٢ خارج قسمة عددين مركبين وتمثيله في صورة متجه .



الشكل ٤ – ٢٢ خارج قسمة عددين مركبين وتمثيله في صورة متجه .

دوران الوحدة التخيلية (j) والمتجه في العدد المركب .

عند ضرب العدد المركب الاختياري $\dot{z} = z\in^{j\theta} = z(\cos\theta + j\sin\theta)$ في الوحدة التخيلية (j) أو في (j -) يمكن إيجاد حاصل الضرب كما يلي :

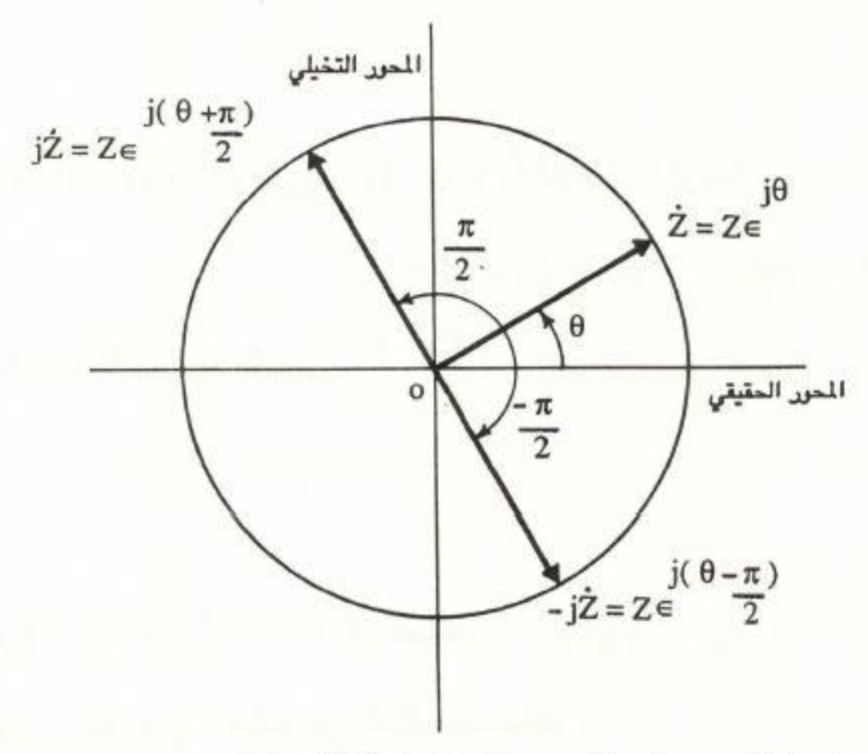
$$\left.\begin{aligned} j &= 1\left(\cos\frac{\pi}{2} + j\sin\frac{\pi}{2}\right) = \in^{j\pi/2} \\ -j &= 1\left\{\cos\left(\frac{-\pi}{2}\right) + j\sin\frac{-\pi}{2}\right)\right\} = \in^{j(-\pi/2)} \end{aligned}\right\} \quad (4-27)$$

ويمكن حساب $j\dot{z}, -j\dot{z}$ كما يلي :

$$\left.\begin{aligned} j\dot{z} &= \in^{j\frac{\pi}{2}} . z\in^{j\theta} = z\in^{j\left(\theta+\frac{\pi}{2}\right)} \\ -j\dot{z} &= \in^{j\left(\frac{-\pi}{2}\right)} . z\in^{j(\theta)} = z\in^{j\left(\theta-\frac{\pi}{2}\right)}, \end{aligned}\right\} \quad (4-28)$$

والقيمة المطلقة لـ $\dot{Z}$ j تساوى القيمة المطلقة لـ $\dot{Z}$. وزاوية $\dot{Z}$ j تساوى زاوية ($\dot{Z}$) مضافًا إليها ($\frac{\pi}{2}$ (rad . والقيمة المطلقة لـ ($\dot{Z}$ j -) تساوي القيمة المطلقة لـ ($\dot{Z}$) أما زاوية ($\dot{Z}$ j -) فتساوي زاوية ($\dot{Z}$) مطروحًا منها ($\frac{\pi}{2}$ (rad .

ويبين الشكل ٤ – ٢٣ هذه العلاقات باستخدام المتجهات .



الشكل ٤ – ٢٣ دوران الوحدة التخيلية (j) والمتجه في العدد المركب .

عند ضرب العدد المركب $\dot{Z}$ في الوحدة التخيلية (j) يحدث دوران للمتجه $\dot{Z}$ في عكس اتجاه عقارب الساعة (الاتجاه الموجب) بمقدار (π / 2 (rad . أما عند ضرب العدد المركب $\dot{Z}$ في (j -) يحدث دوران للمتجه $\dot{Z}$ في اتجاه عقارب الساعة (الاتجاه السالب) بمقدار (π / 2 (rad .

في حسابات الأعداد المركبة يمكن استخدام الإحداثيات المتعامدة أو الدوال المثلثية في عمليات الجمع والطرح، ويمكن استخدام الدوال الأسية في عمليات الضرب والقسمة فتصبح هذه العمليات سهلة .

سؤال٩

اكتب الأعداد المركبة الآتية في صورة الدوال المثلثية .

(1) $2 + j2\sqrt{3}$ (2) $j8$ (3) $1 - j\sqrt{3}$ (4) $4 - j3$

سؤال ١٠

احسب المجموع $\dot{C} = \dot{A} + \dot{B}$ والفرق $\dot{D} = \dot{A} - \dot{B}$ للأعداد المركبة :

$\dot{A} = 50 + j60 \quad , \quad \dot{B} = 10 + j20$

واحسب القيمة المطلقة وزاوية كل من D , C .

سؤال ١١

احسب المجموع $\dot{V}_s = \dot{V}_1 + \dot{V}_2$ للمتجهين $\dot{V}_2 = 100 \in^{j0}$ ، $\dot{V}_1 = 100 \in^{j\pi/3}$ وبين الناتج في شكل متجهات .

سؤال١٢

احسب الفرق $\dot{V}_d = \dot{V}_1 - \dot{V}_2$ للمتجهين

$\dot{V}_1 = 200 \in^{j0} , \ \dot{V}_2 = 200 \in^{j2\pi/3}$

وبين الناتج في شكل متجهات .

سؤال ١٣

احسب حاصل الضرب $\dot{V}_m = \dot{V}_1 \dot{V}_2$ وخارج القسمة $\dot{V}_b = \dot{V}_1 / \dot{V}_2$

للمتجهين $\dot{V}_1 = 100 \in^{j\pi/3}$, $\dot{V}_2 = 20 \in^{j\pi/6}$

سؤال ١٤

عند ضرب عدد مركب في الوحدة التخيلية (j) تكون القيمة المطلقة لحاصل الضرب هي القيمة المطلقة نفسها للعدد المركب، وتكون زاوية حاصل الضرب مساوية لزاوية العدد المركب بعد إضافة $\pi / 2$ (rad) إليها . ما الذى يحدث عند ضرب العدد المركب في (j^2) ؟ وما الذى يحدث عند قسمة العدد المركب على (j) ؟ .

٤ – ٣ حساب الدائرة الكهربائية بطريقة الرموز

درسنا من قبل أن العدد المركب له نفس خواص المتجه كما أنه يعد نوعا من أنواع المتجه. أي إنه يمكن استخدام الأعداد المركبة لتمثيل الجهود والتيارات الجيبية المتغيرة، وكذلك حساب مجموع الجهود ومجموع التيارات .

في هذا الجزء سوف نلقى الضوء على طريقة الرموز التى تستخدم الأعداد المركبة لحساب العلاقة بين الجهد والتيار جبرياً . وبهذه الطريقة يمكن فهم الخواص الكهربائية للدائرة الأساسية للتيار المتغير .

عند تمثيل الأعداد المركبة $\dot{z}_1 , \dot{z}_2$ بالدوال الأسية تكون كالآتي :

$$\dot{z}_1 = z_1 \in^{j\theta_1} , \quad \dot{z}_2 = z_2 \in^{j\theta_2} ,$$

$$\dot{z}_1 \dot{z}_2 = z_1 z_2 \in^{j(\theta_1 + \theta_2)} , \quad \frac{\dot{z}_1}{\dot{z}_2} = \frac{z_1}{z_2} \in^{j(\theta_1 - \theta_2)} , (\dot{z}_2 \neq 0)$$

أي إن ضرب الأعداد المركبة وقسمتها في الصورة الأسية يتم فيها إضافة وطرح الزاوية، أضف إلى ذلك أن العدد المركب المكتوب في الصورة الأسية $\in^{j(\omega t+\theta)}$ لا يتغير عند إيجاد تفاضله أو تكامله بالنسبة للزمن t. ولهذا فإن الأعداد المركبة تعدّ أداة مفيدة جداً للحسابات الجبرية البسيطة وللعلاقات بين الجهد والتيار في الدوائر الكهربائية المعقدة . راجع أيضاً المعادلات (37 – 4) , (44 – 4) والملحق .

٤ – ٣ – ١ تمثيل التيار المتغير الجيبي بالأعداد المركبة

كما درسنا في الجزء السابق يمكن تمثيل التيار المتغير ذي الموجة الجيبية باستخدام المتجهات، كما يمكن ايجاد مجموع التيارات المتغيرة أيضاً باستخدام المتجهات . ودرسنا أيضاً استخدام الأعداد المركبة مثل المتجهات في عمليات مماثلة .

حيث إن التيار المتغير ذو الموجة الجيبية : $i=\sqrt{2}\ I\sin(\omega t+\theta)\quad (A)$

يناظر الجزء التخيلي : $\sqrt{2}\ I\sin(\omega t+\theta)$

من العدد المركب

$$\sqrt{2}\ I\in^{j(\omega t+\theta)} = \sqrt{2}\ I\ \{\cos(\omega t+\theta)+j\sin(\omega t+\theta)\}$$

عند إدارة المتجه [الذى يمثل العدد المركب $\sqrt{2}\ I\in^{j\theta}$ وقيمته تساوي $\sqrt{2}$ مضروبة في قيمة العدد المركب $(I\in^{j\theta})$] حول النقطة O بسرعة دائرية ω (rad) كما في الشكل ٤ – ٢٤ فإن الجزء التخيلي $\sqrt{2}\ I\sin(\omega t+\theta)$ للعدد المركب $\sqrt{2}\ I\ \{\cos(\omega t+\theta)+j\sin(\omega t+\theta)\}$ يمثل التيار المتغير $i\ \{A\}$ الجيبي الموجة .

ويمكن تمثيل الجهد المتغير الجيبى الموجة بالأعداد المركبة مثل التيار المتغير . ومجموع تيارين ذوي موجة جيبية يساوي الجزء التخيلي لمجموع الأعداد المركبة المناظرة لهذين التيارين. ومن ثم فإنه يتم تمثيل مجموع التيارات المتغيرة الجيبية بالعدد المركب وعلى الأخص بالجزء التخيلي منه ، وينطبق ذلك أيضاً على مجموع الجهود الجيبية المتغيرة .

تبين المعادلات الآتية القيم اللحظية للجهد، والتيار المتغير الجيبي ، وتمثيلها بالأعداد المركبة

$$\upsilon = \sqrt{2}\ V \sin(\omega t + \theta_1)$$

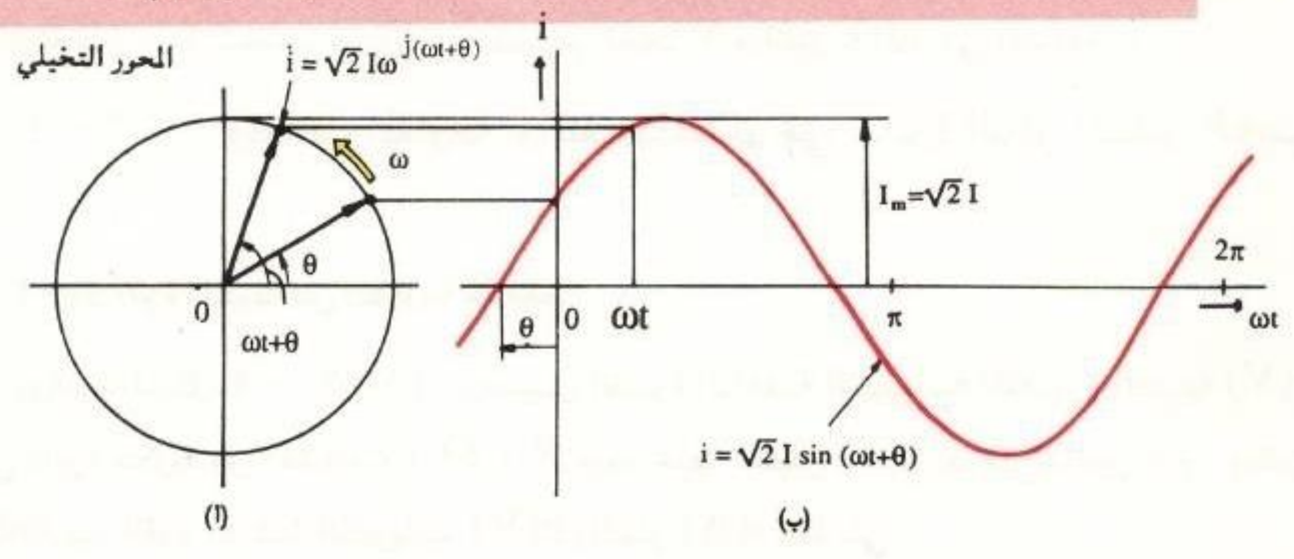
$$i = \sqrt{2}\ I \sin(\omega t + \theta_2)$$

$$\dot{\upsilon} = \sqrt{2}\ V \{ \cos(\omega t + \theta_1) + j \sin(\omega t + \theta_1) \} = \sqrt{2}\ V \in^{j\omega t} \in^{j\theta_1}$$

$$\dot{i} = \sqrt{2}\ I \{ \cos(\omega t + \theta_2) + j \sin(\omega t + \theta_2) \} = \sqrt{2}\ I \in^{j\omega t} \in^{j\theta_2}$$

حيث إن الممانعة $(\dot{z} = \dot{\upsilon} / \dot{i})$ هى متغير يعبر عن صعوبة تدفق التيار المتغير ، وتشبه المقاومة بالنسبة للتيار المستمر . وتكتب الممانعة $\dot{Z}$ فى الصورة الآتية :

$$\dot{z} = \frac{\dot{\upsilon}}{\dot{i}} = \frac{\sqrt{2}\ V \in^{j\omega t} \in^{j\theta_1}}{\sqrt{2}\ I \in^{j\omega t} \in^{j\theta_2}} = \frac{V}{I} \in^{j(\theta_1 - \theta_2)} = \frac{V}{I}\{ \cos(\theta_1 - \theta_2) + j \sin(\theta_1 - \theta_2) \} \quad (4\text{–}29)$$



الشكل ٤ – ٢٤ التناظر بين العدد المركب والتيار المتغير الجيبى الموجة

وكل من الجهد $\dot{\upsilon}$ والتيار $\dot{i}$ داله في الزمن t ، وإذا افترضنا أن التردد الدائرى (ω) لكل من $\dot{V}$ ، $\dot{i}$ متساوٍ ؛ فإن الممانعة $\dot{Z}$ لاتعتمد على الزمن t وذلك لشطب $\in^{j\omega t}$ من كل من البسط والمقام . والزاوية بين المتجهات $\dot{i}$, $\dot{\upsilon}$ لاتتغير مع الزمن .

في دائرة التيار المتغير يمكن تحليل العلاقة بين القيم الفعالة للجهد والتيار وزاوية الطور الابتدائية باستخدام قيمة المانعة $\dot{Z}$ وفى هذه العلاقات نستخدم $\dot{V}/\sqrt{2}$ بدلاً من V .

$$\left.\begin{aligned}
\dot{V} &= V\epsilon^{j\theta_1} = V(\cos\theta_1 + j\sin\theta_1) \\
\dot{I} &= I\epsilon^{j\theta_2} = I(\cos\theta_2 + j\sin\theta_2) \\
z &= \frac{V}{I}\epsilon^{j(\theta_1-\theta_2)} \\
&= \frac{V}{I}\{\cos(\theta_1-\theta_2) + j\sin(\theta_1-\theta_2)\} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}}
\end{aligned}\right\} \quad (4-30)$$

أي إن الجهد $\dot{V}$ يمكن كتابته في صورة عدد مركب ، والقيمة الفعالة لهذا الجهد هي V كقيمة مطلقة وزاوية الوجه الابتدائية هى θ_1. وينطبق ذلك أيضًا على التيار . وباستخدام المعادلة (30 – 4) تحسب قيمة $\dot{Z}$ باستخدام الجهد $\dot{V}$ والتيار $\dot{I}$ المار في المانعة .

٤ – ٣ – ٢ وظائف المقاومة والملف والمكثف في دائرة التيار المتغير الجيبى

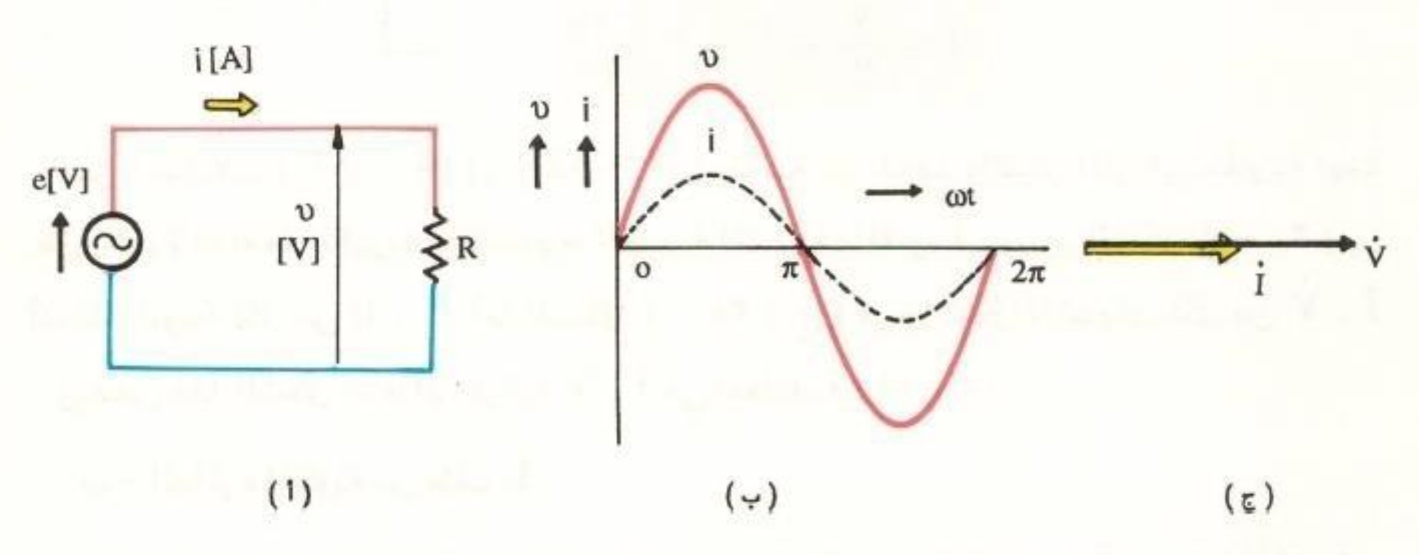
أ – الدائرة المكونة من المقاومة R فقط

يوضح الشكل ٤ – ٢٥ (أ) توصيل القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة الجيبية e(V) فى دائرة مكونة من المقاومة (Ω) R فيمر فيها التيار i(A) طبقًا لقانون أوم . وتكون العلاقة بين القوة الدافعة الكهربائية e(V) والتيار i(A) كما يلي :

$$\left.\begin{aligned}
e &= \sqrt{2}\,E\sin\omega t \\
i &= \frac{e}{R} = \sqrt{2}\,\frac{E}{R}\sin\omega t = \sqrt{2}\,I\sin\omega t
\end{aligned}\right\} \quad (4-31)$$

يتبين من المعادلة (31–4) أن التيار $i\ (A)$ له موجة جيبية وزاويته تساوي زاوية القوة الدافعة الكهربائية $e\ (V)$.

بمرور التيار $i\ (A)$ فى المقاومة $R\ (\Omega)$ يتولد فرق جهد $\upsilon(V)$ في اتجاه مرور التيار نفسه على المقاومة كما هو مبين في الشكل ٤ – ٢٥ (أ) .



الشكل ٤ – ٢٥ الجهد والتيار في دائرة مكونة من مقاومة فقط .

حيث إن العلاقة بين v , e هى (e = v) طبقًا للقانون الثاني لكيرشوف .

بالنسبة للقيم الفعالة نجد أن $E = V$ وتكون المعادلات الخاصة بالجهد $\upsilon\ (V)$ والتيار $i\ (A)$ كما يلي :

$$\left.\begin{aligned} \upsilon &= iR = \sqrt{2}\ V \sin \omega t \\ i &= \frac{\upsilon}{R} = \sqrt{2}\ \frac{V}{R} \sin \omega t = \sqrt{2}\ I \sin \omega t \end{aligned}\right\} \quad (4 - 32)$$

وتبين المعادلة (32 – 4) أن قانون أوم ينطبق على العلاقة بين القيم الفعالة V ، I للجهد والتيار على الترتيب مثل العلاقة نفسها بين الجهد والتيار في دائرة التيار المستمر .

$$I = \frac{E}{R} = \frac{V}{R} \qquad (4 - 33)$$

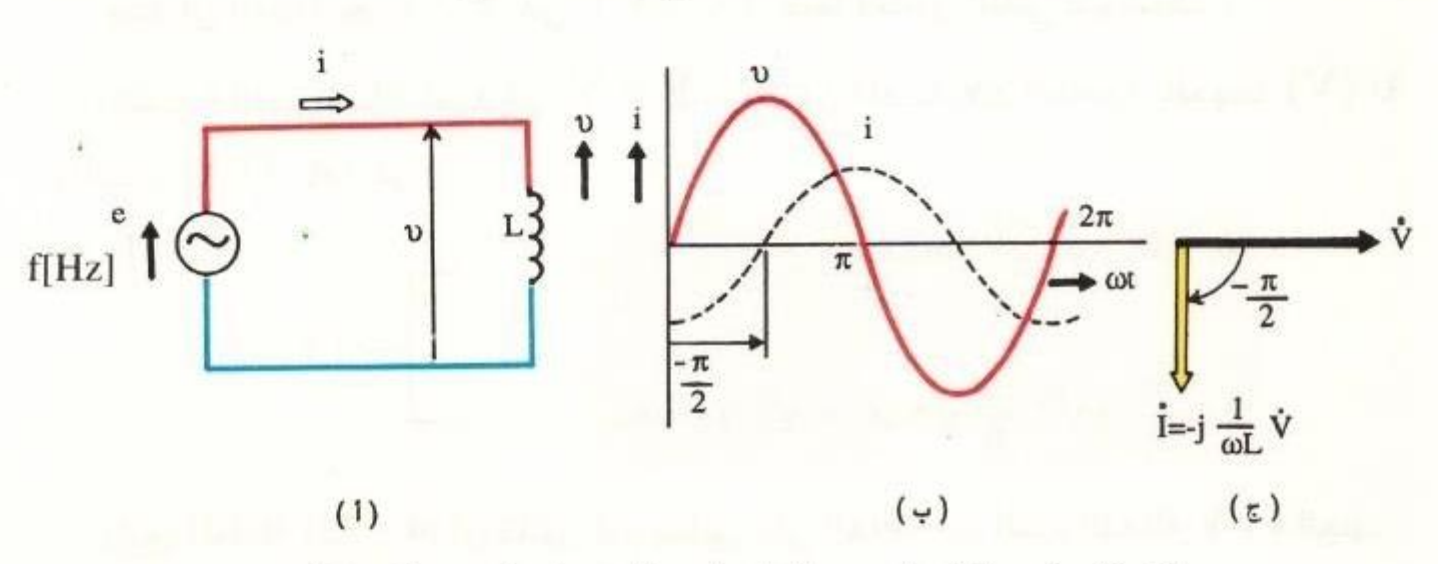
وعند كتابة هذه العلاقات باستخدام الدوال الأسية تكون كما يلى :

$$\left.\begin{aligned} \dot{V} &= V \in^{j0} \\ \dot{I} &= \frac{V}{R} \in^{j0} = I \in^{j0} \end{aligned}\right\} \quad (4 - 34)$$

من المعادلات (31 – 4) و (32 – 4) يتضح أن الجهد والتيار المار في مقاومة لهما طور القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة الجيبية المتصلة بالمقاومة . ويبين الشكل ٤ – ٢٥ (ب) أشكال الموجة لكل من υ , i أما الشكل ٤ – ٢٥ (ج) فيبين شكل المتجهات لكل من $\dot{V}$, $\dot{I}$. ويخص هذا الشكل الأعداد المركبة $\dot{V}$, $\dot{I}$ في المعادلــة (34 – 4).

ب – الدائرة المكونة من ملف L

يبين الشكل ٤ – ٢٦ (أ) توصيل القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة الجيبية $e(V)$ إلى الملف $L(H)$ فيمر التيار $i(A)$ وتتغير قيمة هذا التيار دورياً، ويتسبب في توليد قوة دافعــة كهربائية $e_L(V)$ ذاتية على الملف كما درسنا في الفصل الثاني .



الشكل ٤ – ٢٦ الجهد والتيار في دائرة مكونة من ملف فقط

والمعادلات الخاصة بالقوة الدافعة الكهربائية $e(V)$ لمصدر القدرة والقوة الدافعة الذاتية $e_L(V)$ هي كما يلي :

$$e = \sqrt{2}\ E \sin \omega t \quad (V)$$
$$e_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (V) \qquad (4 - 35)$$

وطبقًا للقانون الثاني لكيرشوف نجد أن $e + e_L = 0$ إذن

$$e = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (V) \qquad (4 - 36)$$

نحصل على العلاقة الآتية :

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{e}{L} = \sqrt{2}\frac{E}{L} \sin \omega t$$

وعند إجراء تكامل لهذه العلاقة بالنسبة للزمن نحصل على معادلة التيار $i(A)$:

$$i = \sqrt{2}\frac{E}{\omega L} \sin (\omega t - \frac{\pi}{2}) \qquad (4 - 37)^{*}$$

* من تعريف التكامل

$$i = \sqrt{2}\frac{E}{L}\int \sin \omega t\, dt = -\sqrt{2}\frac{E}{\omega L}\cos \omega t = \sqrt{2}\frac{E}{\omega L}\sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

ويمكن كتابة ذلك في صورة الدوال الأسية كما يلي :

$$i = \sqrt{2}\frac{E}{L}\int \epsilon^{j\omega t} dt = \sqrt{2}\frac{E}{j\omega L}\epsilon^{j\omega t} = \sqrt{2}\frac{E}{\omega L}(-j\epsilon^{j\omega t}) = \sqrt{2}\frac{E}{\omega L}\epsilon^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})}$$

لاحظ أن شكل الدالة $\epsilon^{j\omega t}$ لم يتغير نتيجة للتكامل بالنسبة للزمن .

راجع أيضاً المعادلات (10) ، (11) في ملحق الكتاب

من المعادلة (37 – 4) نجد أن التيار $i(A)$ المتغير الجيبي يتأخر في زاوية الوجه عن القوة الدافعة الكهربائية $e(V)$ بمقدار $\frac{\pi}{2}$ (rad)

والجهد $\upsilon(V)$ على الملف المبين في شكل ٤ – ٢٦ (أ) يساوي e. ونجد أن القيمة المؤثرة للجهد V والقيمة المؤثرة للقوة الدافعة الكهربائية متساويتان . وتكون المعادلات الخاصة بالجهد $v(V)$ والتيار $i(A)$ في الملف كما يلي :

$$\left.\begin{aligned} \upsilon &= \sqrt{2}\, V \sin \omega t \\ i &= \sqrt{2}\, \frac{V}{\omega L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \sqrt{2}\, I \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}\right\} \quad (4\text{-}38)$$

من المعادلة (38 - 4) يتبين أن العلاقة بين القيم المؤثرة للجهد والتيار كما يلي :

$$\omega L I = V$$

$$\frac{V}{I} = \omega L \qquad (4\text{-}39)$$

الممانعة الحثية لهذه الدائرة المكونة من ملف فقط هي V/I والتي تساوي ωL وتعبر عن صعوبة تدفق التيار . ويرمز لهذه الكمية بالرمز X_L ووحدة قياسه هي (Ω) وقيمة X_L هي :

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \qquad (\Omega) \qquad (4\text{-}40)$$

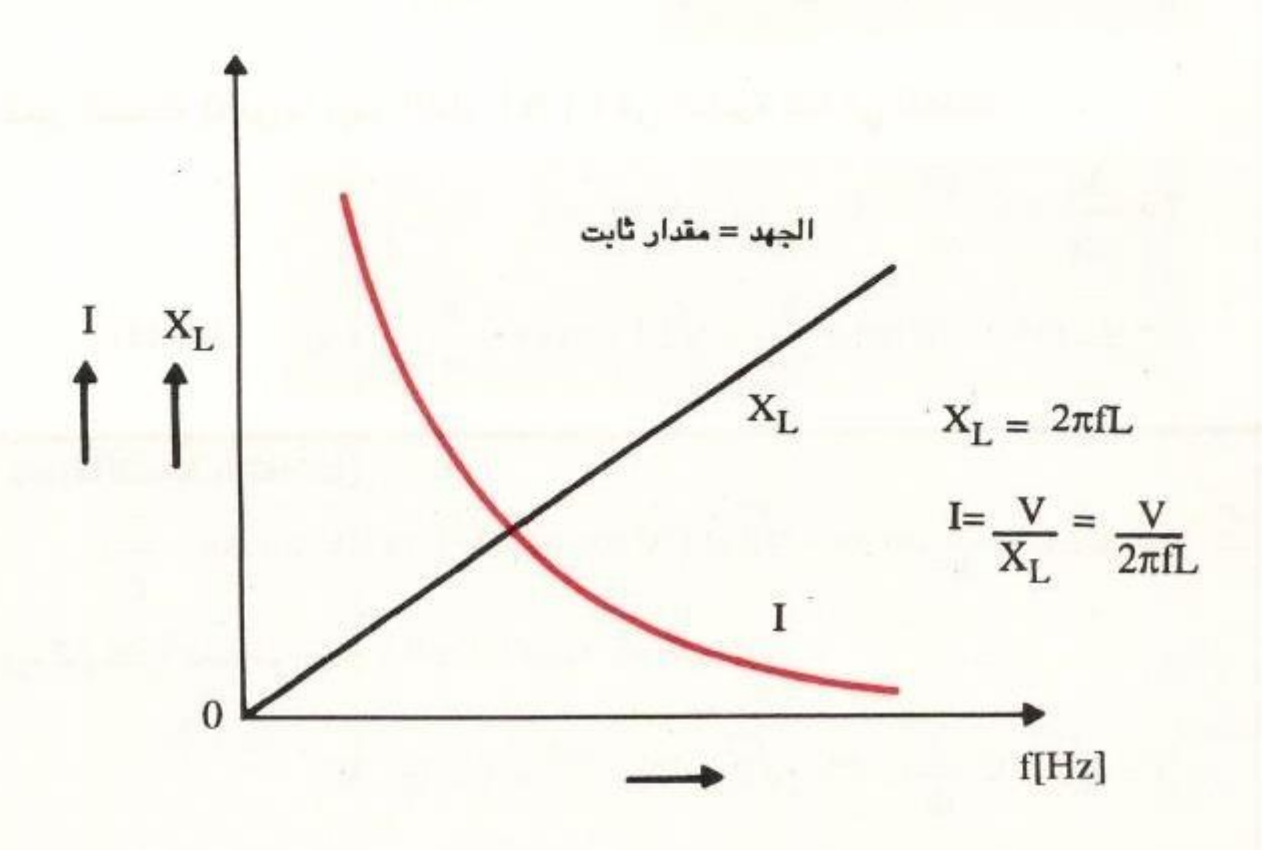
باستخدام المعادلات (48 - 4) ، (49 - 4) يمكن كتابة الممانعة الحثية X_L بمعلومية الدوال الأسية والأعداد المركبة كما يلي :

$$\left.\begin{aligned} \dot{V} &= V\epsilon^{jo} = \omega L I \epsilon^{jo} \\ \dot{I} &= I\epsilon^{j(-\pi/2)} \\ \dot{X}_L &= \frac{\dot{V}}{\dot{I}} = \frac{\omega L I \epsilon^{jo}}{I\epsilon^{j(-\pi/2)}} = \omega L \epsilon^{j\pi/2} = jx_L \end{aligned}\right\} \quad (4\text{-}41)$$

أي أنه في الــدائرة المكـونة من ملف فقط يتأخر التيار في الملف عن الجهد بزاوية مقدارها $\frac{\pi}{2}$ (rad) . ويسمى هذا التيار (التيار المتأخر) . ويتقدم الجهد على التيار بزاوية مقدارها $\pi/2$ (rad)

تبين أشكال ٤ - ٢٦ (ب) ، ٤ - ٢٦ (ج) الاشكال الموجيـة للجـهـد V والتيار وأشكال المتجهات I , V على الترتيب .

تتناسب الممانعة الحثية X_L للملف مع تردد مصدر القدرة ($f(Hz)$) وعند استخدام قيمة ثابتة للجهد فإن التيار ($I(A)$) المار في الدائرة يتناسب عكسيا مع التردد (f) ويبين الشكل ٤ - ٢٧ الخواص الترددية لكل من I , X_L .



الشكل ٤ - ٢٧ الخواص الترددية لكل من I , X_L

حـ - الدائرة المكونة من مكثف C فقط

يبين شكل ٤ – ٢٨ (أ) توصيل القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة الجيبية e{V} إلى المكثف C(F). والجهد v(V) على المكثف C (والذي يساوي القوة الدافعة الكهربائية e(V) وقيمته المؤثرة تساوي القيمة المؤثره للقوة الدافعة الكهربائية) يمكن كتابة معادلته في الصورة الآتية :

$$e = \sqrt{2}\, E \sin \omega t \quad (V)$$

$$\upsilon = \sqrt{2}\, V \sin \omega t \quad (V) \qquad (4\text{-}42)$$

يخزن المكثف C الشحنة q (C) التي تتناسب مع الجهد υ (V) كما درسنا في الفصل الثالث :

$$q = C\upsilon = \sqrt{2}\, CV \sin \omega t \quad (V) \qquad (4\text{-}43)$$

تتغير الشحنة q دوريا ويمر التيار i {A} في الدائرة كما في المعادلة :

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = C\frac{\Delta V}{\Delta t} = C\frac{\Delta}{\Delta t}(\sqrt{2}\, V \sin \omega t)$$
$$= \sqrt{2}\, \omega CV \sin (\omega t + \frac{\pi}{2}) = \sqrt{2}\, I \sin (\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (A) \qquad (4\text{–}44)^{*}$$

*** طبقا لتعريف التفاضل**

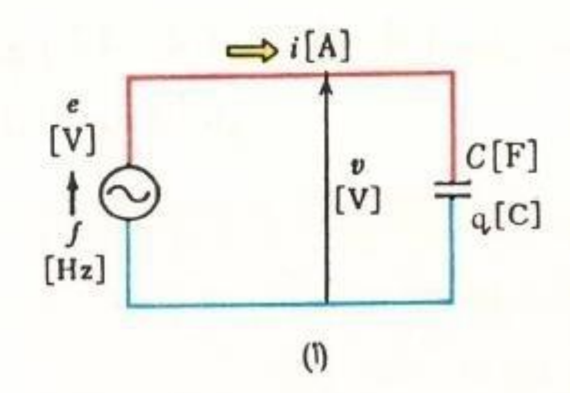
$$i = \sqrt{2}\, CV \frac{d}{dt} \sin \omega t = \sqrt{2}\, \omega CV \cos \omega t = \sqrt{2}\, \omega CV \sin (\omega t + \frac{\pi}{2})$$

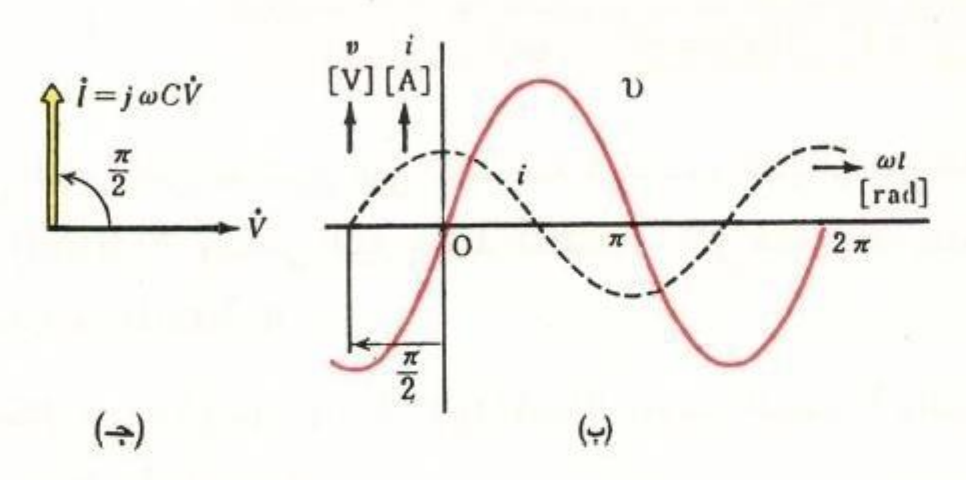
ويمكن كتابة ذلك في صورة الدوال الأسية كما يلى :

$$i = \sqrt{2}\, CV \frac{d}{dt} \epsilon^{j\omega t} = j\sqrt{2}\, \omega CV \epsilon^{j\omega t} = \sqrt{2}\, \omega CV \epsilon^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})}$$

ويلاحظ أن الدالة $\epsilon^{J\omega t}$ لايتغير شكلها عند إجراء عملية التفاضل بالنسبة للزمن.

راجع أيضاً المعادلات (7) ، (9) في ملحق الكتاب





شكل ٤ – ٢٨ الجهد والتيار في دائرة مكونة من مكثف فقط .

ويمكن استنتاج المعادلة الآتية من المعادلة (44 - 4)

$$\omega CV = I$$

$$\frac{V}{I} = \frac{1}{\omega C} \qquad (4-45)$$

أي إن ممانعة المكثف هي $(1 / \omega c)$ تعبر عن صعوبة تدفق التيار مثل ماسبق قوله عن المقاومة والممانعة الحثية. ورمز ممانعة المكثف هو X_C ووحدة قياسه هي (Ω)

وقيمة X_C هي :

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} [\Omega] \qquad (4-46)$$

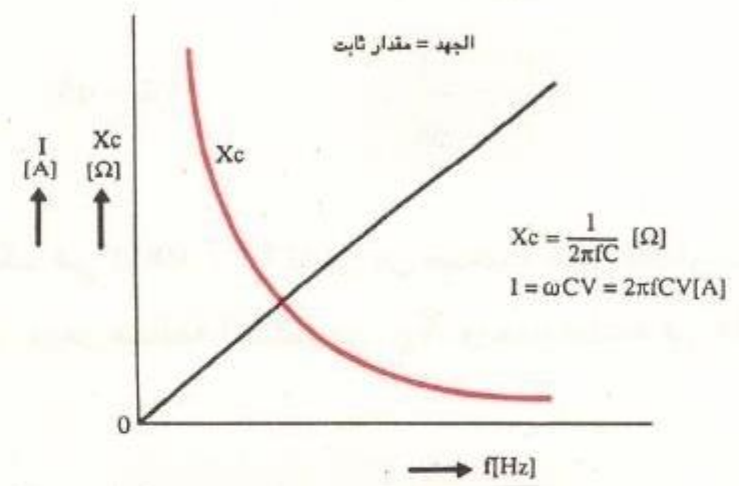
وباستخـــدام المعـادلات (42 - 4) , (44 - 4) يمكن تمثيل مفاعلة المكثف X_C عن طريق الأعداد المركبة والدوال الأسية كما يلي :

$$\left.\begin{aligned} \dot{V} &= V\epsilon^{jo} \\ \dot{I} &= \omega CV\epsilon^{j\pi/2} = I\epsilon^{j\pi/2} \\ \dot{X}_C &= \frac{\dot{V}}{\dot{I}} = \frac{V\epsilon^{jo}}{\omega CV\epsilon^{j\pi/2}} = \frac{1}{\omega C}\epsilon^{j(-\pi/2)} = -jX_C \end{aligned}\right\} \quad (4 - 47)$$

أي إنه في الدائرة التي تحـتـوي على مكثف فـقط يتـقـدم التـيـار على الجـهـد بزاوية مقــــدارهــا$\pi/2(rad)$ ويسمى التيار (التيار المتقدم) . وفي هذه الحالة يتأخر الجهد عن التيار بزاوية مقدارها $\pi/2(rad)$.

وتبين الأشكال ٤ – ٢٨ (ب) و ٤ – ٢٨ (ج) الأشكال الموجية للجهد $\dot{V}$ والتيار $\dot{I}$ وأشكال المتجهات لكل من I , V على الترتيب.

وتتناسب مفاعلة المكثف X_C عكسيا مع تردد مصدر القدرة $f(Hz)$ وعند استخدام جهد ثابت فإن التيار $I(A)$ المار في الدائرة يتناسب طرديًا مع التردد كما هو موضح في الشـكل ٤ – ٢٩ .



الشكل ٤ – ٢٩ الخواص الترددية لـ X_C , I

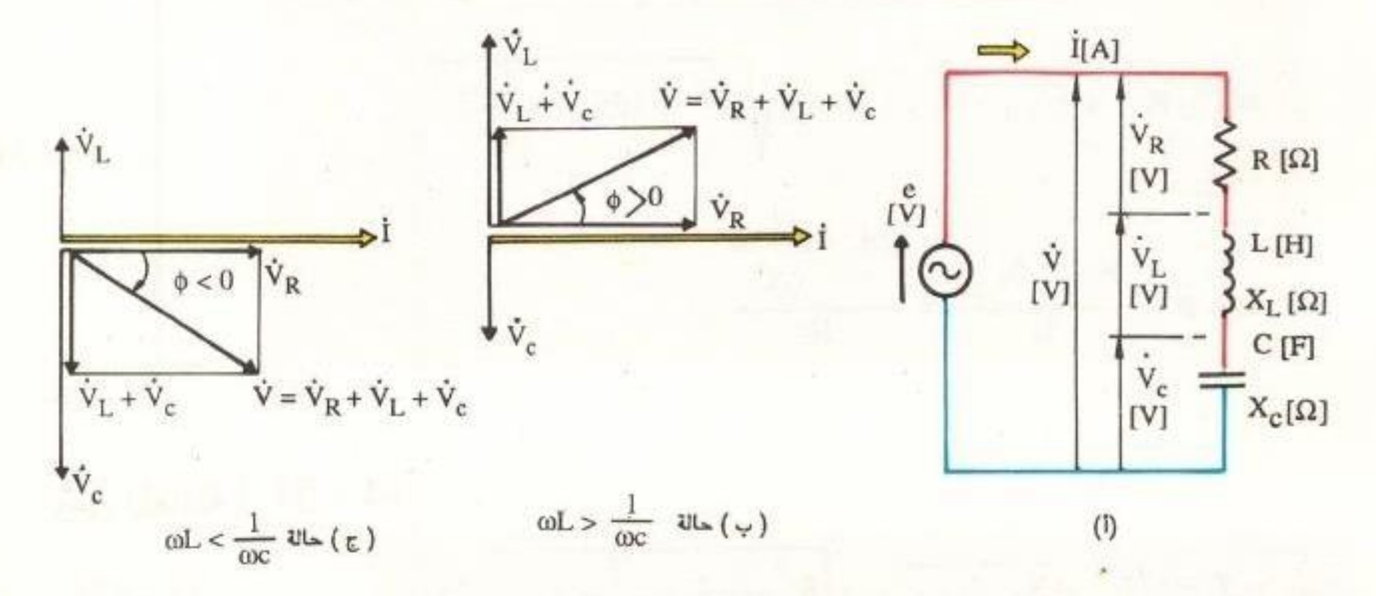
د - دائرة توالي RLC

يبين الشكل ٤ - ٣٠ (أ) دائرة تحتوي على R , L , C موصلة على التوالي يغذيها قوة دافعة كهربية متغيرة جيبية $e(V)$ فيمر تيار متغير جيبي $i(V)$ طبقًا للمعادلة :

$$i = \sqrt{2}\ I \sin \omega t\ (A) \qquad (4-48)$$

وعندما نفترض أن الجهد المتولد على أطراف المقاومة R والملف L والمكثف C هي V_R ، V_L ، V_C على الترتيب ، وأن الجهد الموجود على الدائرة كلها هو $V(V)$ كما في المعادلات الآتية :

$$\left.\begin{aligned}
\upsilon_R &= \sqrt{2}\ V_R \sin \omega t = \sqrt{2}\ RI \sin \omega t \\
\upsilon_L &= \sqrt{2}\ V_L \sin (\omega t + \frac{\pi}{2}) = \sqrt{2}\ X_L\ I \sin (\omega t + \frac{\pi}{2}) \\
\upsilon_C &= \sqrt{2}\ V_C \sin (\omega t - \frac{\pi}{2}) = \sqrt{2}\ X_C\ I \sin (\omega t - \frac{\pi}{2}) \\
\upsilon &= \upsilon_R + \upsilon_L + \upsilon_C = \sqrt{2}\ V \sin (\omega t + \phi)
\end{aligned}\right\} \quad (4-49)$$



الشكل ٤ - ٣٠ الجهد والتيار في دائرة توالي RLC

وباستخدام الدوال الأسية يمكن كتابة المعادلات (48 - 4) , (49 - 4)

كما يلي :

$$\begin{aligned}
\dot{I} &= I \in^{j0} = I\,(A) \\
\dot{V}_R &= V_R \in^{j0} = RI \in^{j0} = RI\,(V) \\
\dot{V}_L &= V_L \in^{j\pi/2} = X_L I \in^{j\pi/2} = jX_L I\,(V) \\
\dot{V}_C &= V_C \in^{j(-\pi/2)} = X_C I \in^{j(-\pi/2)} = -jX_C I\,(V) \\
\dot{V} &= \dot{V}_R + \dot{V}_L + \dot{V}_C = V \in^{j\phi} \\
&= RI \in^{j0} + X_L I \in^{j\pi/2} + X_C I \in^{j(-\pi/2)} \\
&= RI + j(X_L I - X_C I) \quad (V)
\end{aligned} \qquad (4 - 50)$$

وتبين الأشكال ٤ - ٣٠ (ب) ، ٤ - ٣٠ (ج) أشكال المتجهات للعلاقات بين الجهد والتيار في هذه المعادلة . ومن ثم يمكن كتابة العلاقة بين V , I كما يلي :

$$\begin{aligned}
V &= |\dot{V}| = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} = \sqrt{(RI)^2 + (X_L I - X_C I)^2} \\
&= I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = I\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \\
\tan\phi &= \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}
\end{aligned} \qquad (4 - 51)$$

ومن المعادلة (51 - 4) :

$$\frac{V}{I} = Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (\Omega) \qquad (4 - 52)$$

ويمكن استنتاج $(\dot{Z} = \dot{V} / \dot{I})$ الممانعة من المعادلة (50 - 4) كما يلي :

$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}} = \frac{V\epsilon^{j\phi}}{I\epsilon^{j0}} = Z\epsilon^{j\phi} = R + j(X_L - X_C) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \ (\Omega) \quad (4 - 53)$$

وكما ذكرنا من قبل فإن R ، $\dot{X}_L = j\omega L$, $\dot{X}_c = -j\frac{1}{\omega C}$ هي ممانعة الدائرة المكونة من مقاومة فقط و ملف فقط ، ومكثف فقط على الترتيب .

الزاوية ϕ في المعادلة (53 - 4) هي زاوية الجهد بالنسبة للتيار، وتحسب من المعادلة (51 - 4) وتسمى زاوية الممانعة أو زاوية معامل القدرة .

في المعادلات (52 - 4) و (53 - 4) وفي حالة $(\omega L > \frac{1}{\omega C})$ تكون الدائرة حثية وتكون زاوية الممانعة ϕ موجبة, ويكون التيار متأخراً عن الجهد بمقدار زاوية الممانعة ϕ . وهذه العلاقة يوضحها الشكل ٤ – ٣٠ (ب) في صورة متجهات . أما في حالة $(\omega L < \frac{1}{\omega C})$ فإن الدائرة تكون دائره ذات سعة (شبيهة بالمكثف) وتكون زاوية الممانعة ϕ سالبة ويكون التيار سابقا للجهد بمقدار القيمة المطلقة لزاوية الممانعة ϕ . وهذه العلاقة يوضحها الشكل ٤ – ٣٠ (ج) في صورة متجهات .

وفي حالة $(\omega L = \frac{1}{\omega C})$ يحدث رنين التوالي ، ويكون الجهد والتيار لهما زاوية الطور نفسها .

في دائرة توالي RL تستخدم المعادلات (52 - 4) و (53 - 4) بعد وضع $(X_C=O)$ وفي دائرة توالي RC تستخدم المعادلات (52 - 4) و (53 - 4) بعد وضع $(X_L=O)$.

سؤال ١٥

احسب ممانعة الملف X_L إذا كانت $f = 50$ Hz , $L = 0.5$ H

سؤال١٦

احسب ممانعة الملف X_C إذا كانت $C = 30\ \mu F\ ,\ f = 6kHz$

سؤال١٧

نفترض أن الجهد على دائرة توالي RL هو $\dot{V} = 100 \in^{j0}(V)$

ويمر تيار $\dot{I} = 5 \in^{j(-\pi/3)}$ خلال هذه الدائرة . أكتب الممانعة $\dot{Z}$ لهذه الدائرة باستخدام الدوال المثلثية والإحداثيات المتعامدة .

سؤال١٨

دائرة توالي RLC بياناتها هي : $R=3(\Omega), X_L= 6(\Omega), X_c = 2(\Omega)$

يغذيها جهد متغير جيبي، القيمة الفعالة له هي $100(V)$. احسب ما يلي :

(١) الممانعة $\dot{Z}$ وقيمة $Z\ (\Omega)$ لهذه الدائرة .

(٢) التيار $\dot{I}$ وقيمة $I(A)$ المار في الدائرة .

(٣) زاوية الممانعة ϕ

سؤال١٩

دائرة توالي RC بياناتها هي : $R=8(\Omega)\quad ,\quad X_C= 6(\Omega)$

يغذيها جهد متغير جيبي، القيمة الفعالة له هي $12(V)$. احسب ما يلي :

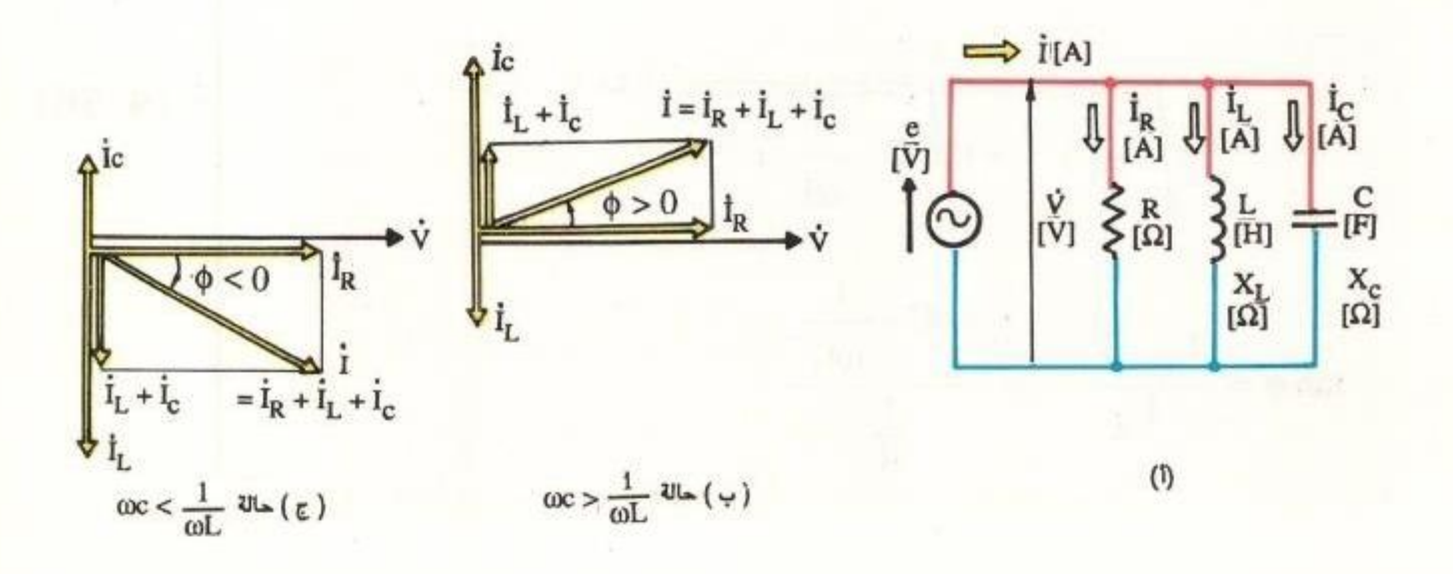
(١) الممانعة $\dot{Z}$ وقيمة $Z(\Omega)$ لهذه الدائرة .

(٢) التيار $\dot{I}$ وقيمة $I(A)$ المار في هذه الدائرة .

هـ-دائرة التوازي RLC

يبين الشكل ٤ - ٣١ (أ) توصيل القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة الجيبية e(V) إلى دائرة مكونة من R , L , C متصلة على التوازي . ويمكن حساب قيمة التيار المار في كل فرع من هذه الدائرة كما يلي :

$$\left.\begin{aligned}
\dot{V} &= V\epsilon^{j0} \quad (V) \\
\dot{I}_R &= I_R\epsilon^{j0} = \frac{V}{R} \quad (A) \\
\dot{I}_L &= I_L\epsilon^{j(-\pi/2)} = -j\frac{V}{X_L} = -j\frac{V}{\omega L} \quad (A) \\
\dot{I}_C &= I_C\,\epsilon^{j(\pi/2)} = j\frac{V}{X_C} = j\omega CV \quad (A) \\
\dot{I} &= \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C = V\left\{\frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)\right\} = I\epsilon^{j\phi} \quad (A)
\end{aligned}\right\} \quad (4\text{-}54)$$



الشكل ٤ - ٣١ الجهد والتيار في دائرة التوازي RLC

ومن هذه المعادلات يمكن كتابة معادلة ممانعة هذه الدائرة كما يلي :

$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}} = \frac{V\epsilon^{j0}}{I\epsilon^{j\phi}} = Z\epsilon^{j(-\phi)} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})}$$

$$= \frac{\frac{1}{R}}{(\frac{1}{R})^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2} - j\frac{\omega C - \frac{1}{\omega L}}{(\frac{1}{R})^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2} \; (\Omega) \qquad (4\text{-}55)$$

وكتابة معادلة القيمة المطلقة Z وزاوية الممانعة ϕ للممانعة $\dot{Z}$ تكون كما يلى :

$$Z = |\dot{Z}| = \sqrt{\left\{\frac{\frac{1}{R}}{(\frac{1}{R})^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2}\right\}^2 + \left\{\frac{\omega C - \frac{1}{\omega L}}{(\frac{1}{R})^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2}\right\}^2}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{(\frac{1}{R})^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2}} \; (\Omega) \qquad (4\text{-}56)$$

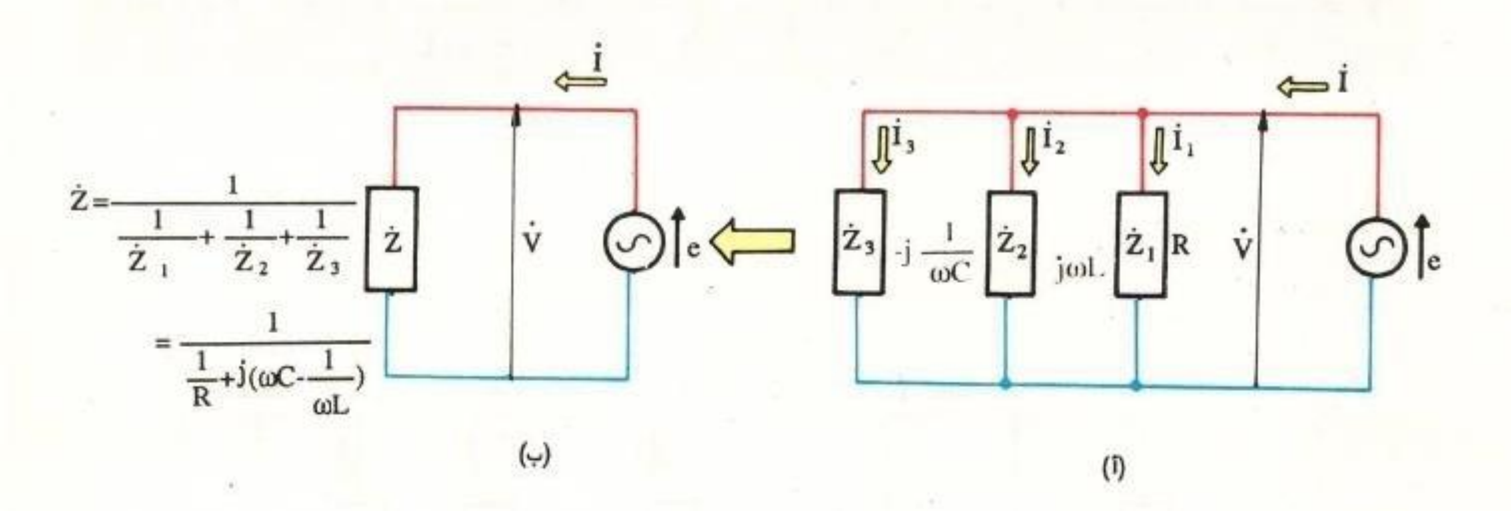
$$\tan\phi = \frac{I_C - I_L}{I_R} = \frac{\omega C - \frac{1}{\omega L}}{\frac{1}{R}}$$

و- طريقة حساب دائرة التوازي باستخدام السماحية (admittance)

يمكن التعبير عن الممانعات $\dot{Z}_3$, $\dot{Z}_2$, $\dot{Z}_1$ فى أفـــرع دائرة الشكل ٤ - ٣١ (أ) بالمعادلات الآتية :

$$\dot{Z}_1 = R\ (\Omega),\quad \dot{Z}_2 = jX_L = j\omega L\ (\Omega),\quad \dot{Z}_3 = -jX_c = -j\frac{1}{\omega C}\ (\Omega) \qquad (4-57)$$

ويبين الشكل ٤ - ٣٢ (أ) والشكل ٤ - ٣٢ (ب) هذه العلاقات .



الشكل ٤ - ٣٢ دائرة التوازي RLC والممانعة

والسماحية هى مقلوب الممانعة، ويرمز لها بالرمز $\dot{Y}$ ووحدة قياسها سيمنس (S) ويمكن كتابة المعادلة (57 - 4) بدلالة السماحية كما يلي :

$$\left.\begin{aligned} &\dot{Y}_1 = \frac{1}{\dot{Z}_1} = \frac{1}{R}\ (S)\quad ,\quad \dot{Y}_2 = \frac{1}{\dot{Z}_2} = \frac{1}{j\omega L} = -j\frac{1}{\omega L}\ (S) \\ &\dot{Y}_3 = \frac{1}{\dot{Z}_3} = \frac{1}{-j\frac{1}{\omega C}} = j\omega C\ (S) \end{aligned}\right\} (4-58)$$

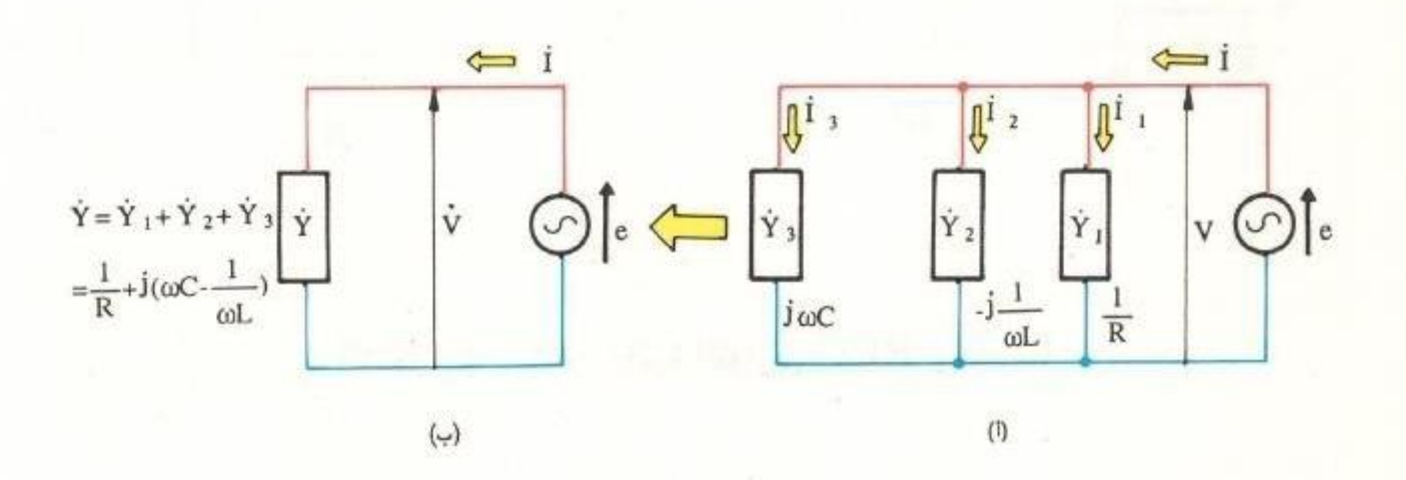
ويمكن كتابة معادلة التيارات كما يلي :

$$\dot{I}_1 = \dot{Y}_1 \dot{V}\ (A), \quad \dot{I}_2 = \dot{Y}_2 \dot{V}\ (A), \quad \dot{I}_3 = \dot{Y}_3 \dot{V}\ (A)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = (\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3)\ \dot{V} \quad (A) \qquad (4-59)$$

من المعادلات السابقة تحسب السماحية الكلية $\dot{Y}$ لدائرة التوازي كمجموع سماحيات أفرع الدائرة :

$$\dot{Y} = \frac{\dot{I}}{\dot{V}} = \frac{1}{\dot{Z}} = \dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3 = \frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)\ (S) \qquad (4-60)$$



الشكل ٤ – ٣٣ دائرة التوازي RLC والسماحية .

ويبين الشكلان ٤ – ٣٣ (أ) و ٤ – ٣٣ (ب) هذه العلاقات .

ويمكن كتابة السماحية (مقلوب الممانعة) فى صورة العدد المركب

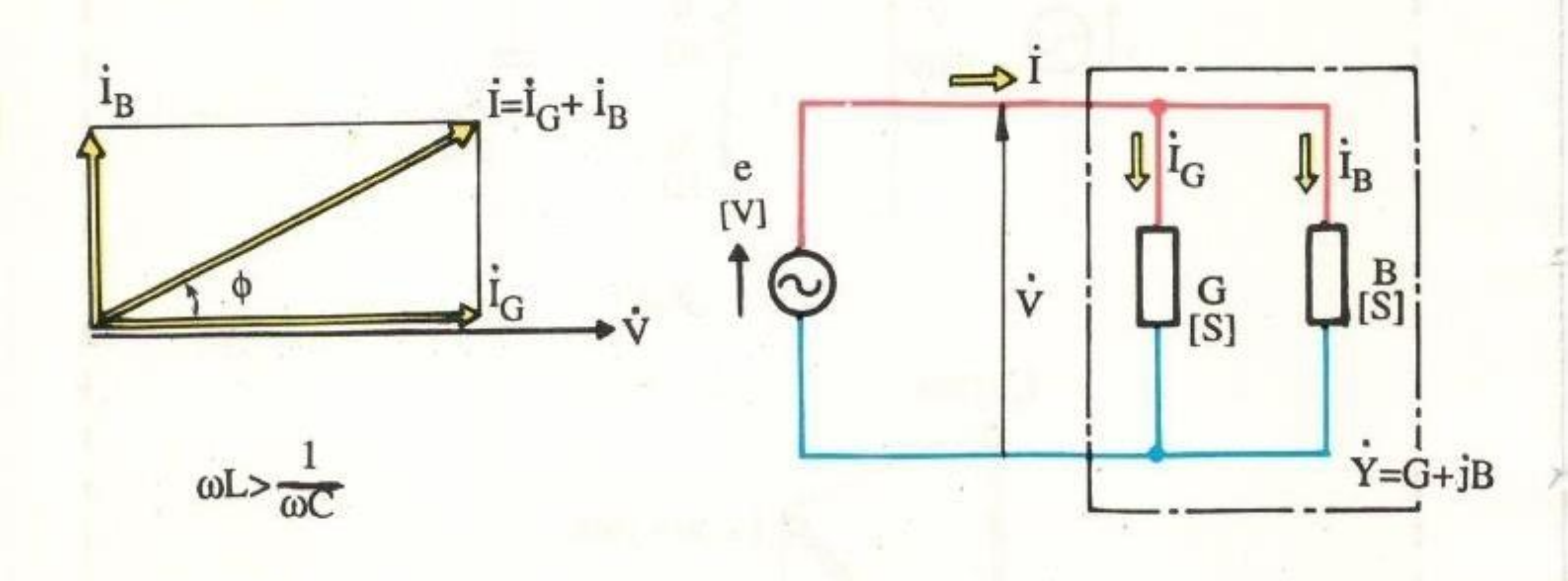
$$\dot{Y} = G + jB \quad (S) \qquad (4-61)$$

ومن المعادلة السابقة نجد أن (G) هى التوصيلية و (B) هى التعرضية ، ووحدة قياس كل منهما سيمنس (S) .

تبين المعادلة الآتية القيمة المطلقة $\dot{Y}$ للسماحية Y وفرق الطور ϕ بين الجهد والتيار ويبين الشكل ٤ – ٣٤ شكل المتجهات والدائرة المكافئة .

$$Y = |\dot{Y}| = \sqrt{G^2 + B^2} \quad (S) \ , \ \tan\phi = B/G \qquad (4-62)$$

ويمكن تسهيل حسابات دائرة التوازي باستخدام السماحية .



(أ) الدائرة المكافئة

(ب) شكل المتجهات

الشكل ٤ – ٣٤ السماحية والدائرة المكافئة

مثال٢

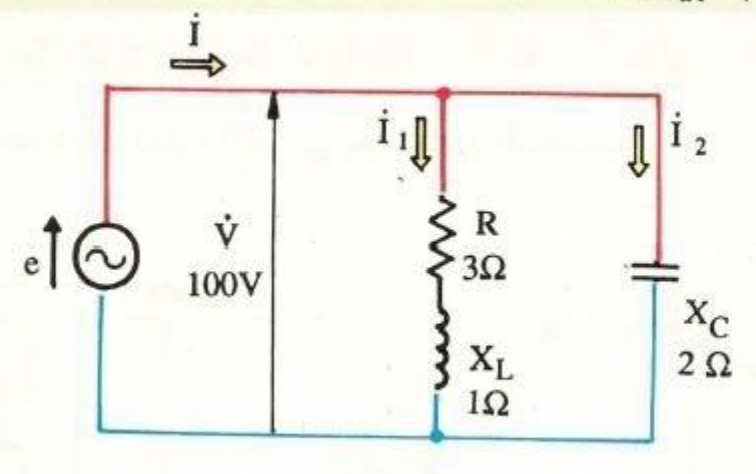
احسب المتغيرات التالية للدائرة المبينة في الشكل ٤ – ٣٥ وارسم شكل المتجهات بالقياس إلى الجهد .

(١) السماحية الكلية $\dot{Y}(S)$ للدائرة .

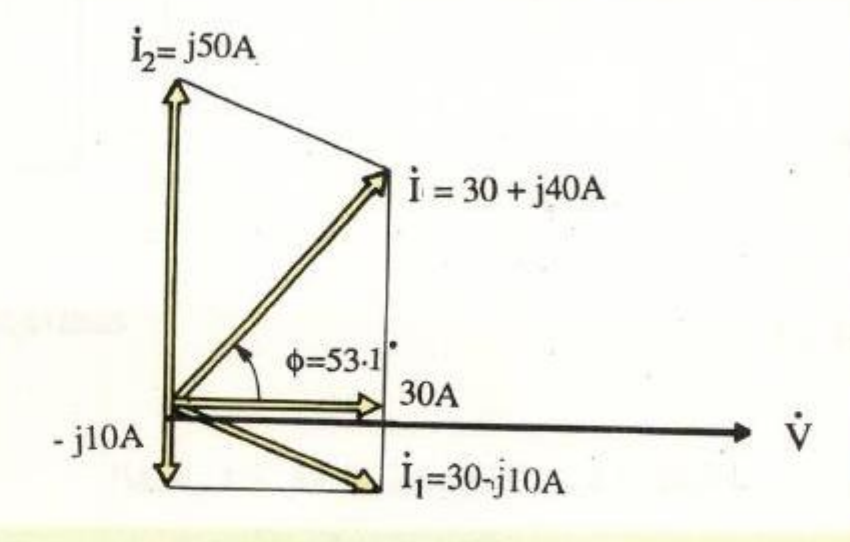
(٢) الممانعة الكلية $\dot{Z}\,(\Omega)$ للدائرة

(٣) التيارات $\dot{I}(A)\,,\ \dot{I}_1(A)\,,\ \dot{I}_2(A)$

(٤) فرق الطور ϕ بين $\dot{V}\,,\ \dot{I}$.



الشكل ٤ – ٣٥ .



الشكل ٤ – ٣٦ رسم المتجهات بالقياس إلى الجهد

الحل

(1) $\dot{Y}_1 = \frac{1}{3 + j1} = 0.3 - j\,0.1 \;\; S \qquad \dot{Y}_2 = \frac{1}{-j2} = j\,0.5 \;\; S$

$\dot{Y} = \dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 = 0.3 - j\,0.1 + j\,0.5 = 0.3 + j\,0.4 \;\; S$

(2) $\dot{Z} = \frac{1}{\dot{Y}} = \frac{1}{0.3 + j\,0.4} = 1.2 - j\,1.6 \;\; \Omega$

(3) $\dot{I}_1 = \dot{Y}_1 \dot{V} = (0.3 - j\,0.1) \times 100 = 30 - j\,10 \;\; A$

$\dot{I}_2 = \dot{Y}_2 \dot{V} = j\,0.5 \times 100 = j\,50 \;\; A$

$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 30 - j\,10 + j\,50 = 30 + j\,40 \;\; A$

(4) $\tan \Phi = \frac{B}{G} = \frac{0.4}{0.3} = 1.33 \qquad \Phi = 53.1^{o}$

سؤال ٢٠

لنفترض أن دائرة التوازى في الشكل ٤ – ٣١ لها المعاملات الآتية :

$\dot{V} = 120\ (V)\ , \quad R = 30\,(\Omega)\,, \quad X_L = 20\,(\Omega)\ , \quad X_C = 40\ (\Omega)$

أجب عن الأسئلة الآتية مع مراعاة حل الأسئلة (١) ، (٢) ، (٣) باستخدام الإحداثيات المتعامدة والدوال المثلثية :

(١) السماحية الكلية $\dot{Y}$ للدائرة .

(٢) الممانعة الكلية $\dot{Z}$ للدائرة .

(٣) التيار $\dot{I}$ المار في الدائرة .

(٤) رسم المتجهات بالقياس إلى الجهد .

ي - رنين التوالــى Series resonance

يمكن كـتــابة ممانعــة دائرة توالى RLC فى الشكل ٤ – ٣٧ فى الصــورة التى تم استنتاجها في المعادلة (53 - 4) .

وفي هذه المعادلة يـصبح الـجزء التخـيلى مـساويًا لـلـصفر أى ($\dot{Z} = R$) عندمــا يــكون ($\omega L = 1 / \omega C$) وتكون القيمة المطلقة للممانعة أقل مايمكن ، ويكون التيار المار في الدائرة أكبر مـايمكن . تسمى هذه الحالة رنين التوالى . والتردد الذى يحدث عنده الرنين يسمى تردد الرنين ، ويرمز له بالرمز f_o والتردد الدائرى عند الرنين هو ω_o حيث :

$$\omega_o L = \frac{1}{\omega_o C} \ , \quad 2\pi f_o L = \frac{1}{2\pi f_o C}$$

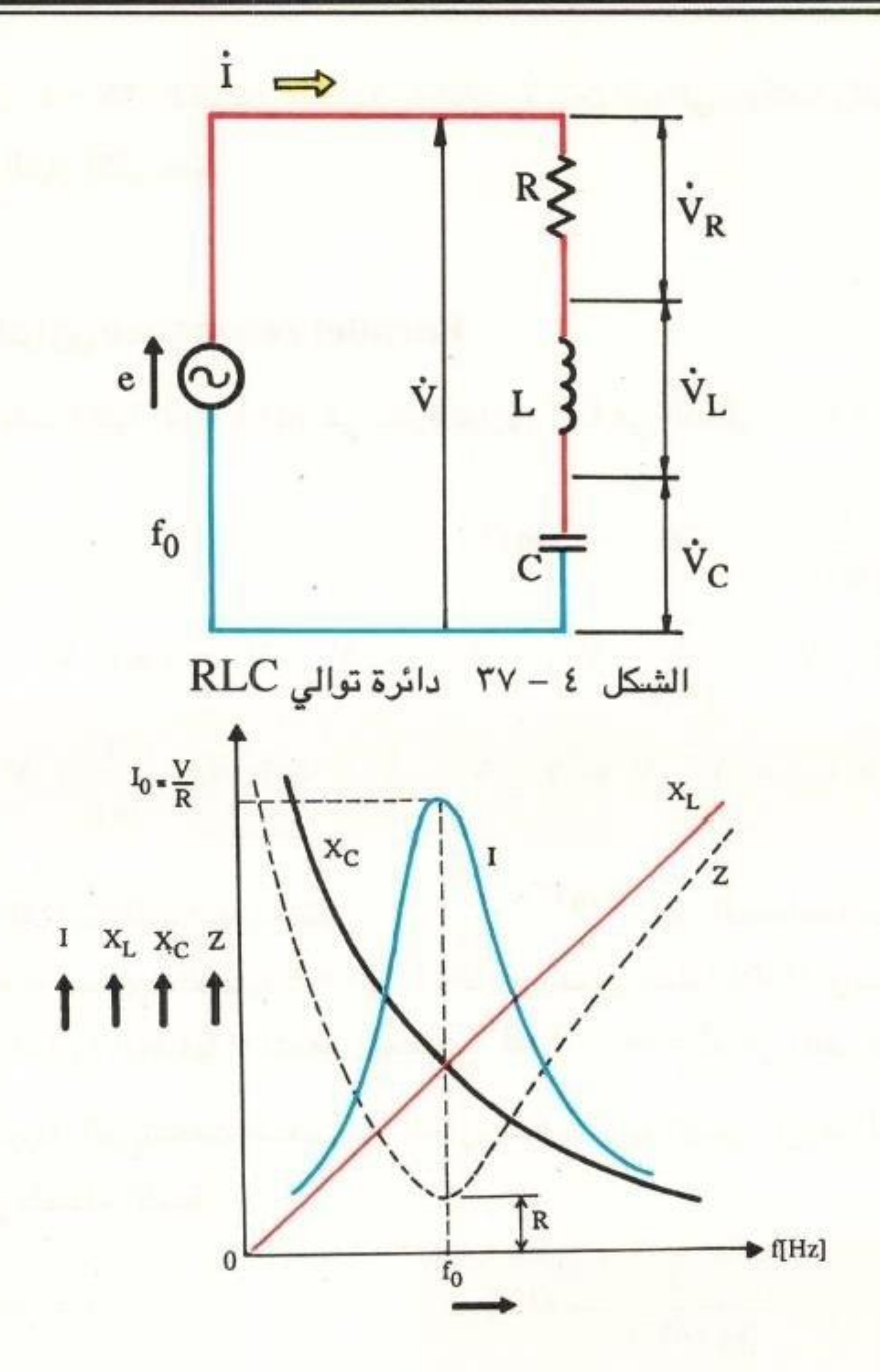
$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (Hz) \qquad (4-63)$$

ويتحدد تردد رنين الدائرة بقيمة الملف وقيمة المكثف دون النظر إلى قيمة المقاومة، وعند الرنين يكون فرق الجهد بين أطراف الملف والمكثف كما يلي :

$$V_L = V_C = \frac{V}{R} \omega_o L = \frac{V}{R} \cdot \frac{1}{\omega_o C}$$

$$\frac{V_L}{V} = \frac{V_C}{V} = \frac{\omega_o L}{R} = \frac{1}{R \omega_o C} = Q \qquad (4-64)$$

قيمة Q فى المعادلة السابقة هى النسبة بين V , V_L أو بين V , V_C عند الرنين وتسمى معامل جودة الدائرة، وتعبر عن حدة الرنين .



الشكل ٤ – ٣٧ دائرة توالي RLC

الشكل ٤ – ٣٨ الخواص الترددية لدائرة رنين التوالى .

أي إن فرق الجهد على الملف يساوى قيمة Q مضروبة في جهد مصدر القدرة V وأيضاً فرق الجهد على المكثف يساوى قيمة Q مضروبة في جهد مصدر القدرة V عند تردد الرنين .

يبين الشكل ٤ – ٣٨ الخواص الترددية لدائرة رنين التوالى . وكلما زادت قيمة Q أصبح منحنى التيار أكثر حدة .

ط – رنين التوازي Parallel resonance

تعطي المعادلات الآتية التيار $\dot{I}$ المار في دائرة توازى LC في الشكل ٤ – ٣٩ :

$$\dot{Y}_1 = \frac{1}{j\omega L} \quad , \quad \dot{Y}_2 = j\omega C$$

$$\dot{I}_1 = \dot{Y}_1 \dot{V} = \frac{1}{j\omega L} \dot{V} \; , \quad \dot{I}_2 = \dot{Y}_2 \dot{V} = j\omega C \dot{V}$$

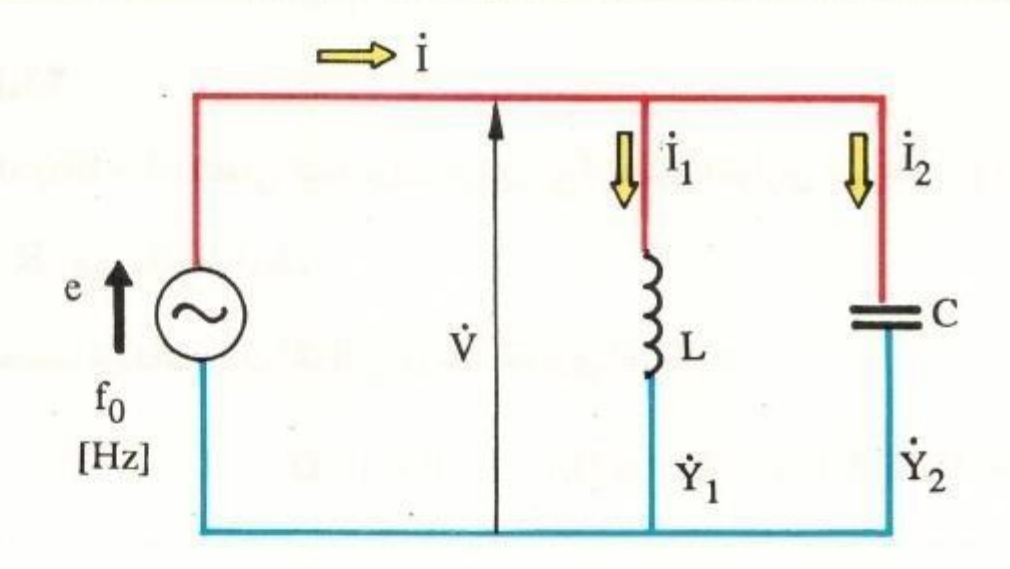
$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{Y}_1 \dot{V} + \dot{Y}_2 \dot{V} = \dot{Y} \dot{V} = j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) \dot{V} \qquad (4-65)$$

وتبين المعادلة السابقة أنه عندما يكون $\left(\omega C = \frac{1}{\omega L}\right)$ فإن السماحية تساوى صفراً $(\dot{Y}=0)$ والممانعة تساوى مالانهاية $(\dot{Z}=\infty)$ والتيار يساوى صفراً $(\dot{I}=0)$ ويسمى ذلك رنين التوازي . في الدائرة الحقيقية لا تتحقق المعادلتان $\dot{I}=0$ و $\dot{Z}=\infty$ لأن الملف له مقاومة.

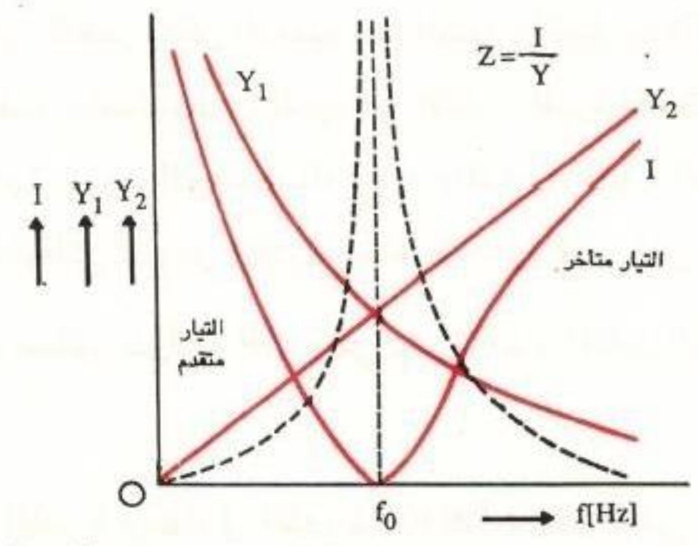
يسمى التردد الذي يحدث عنده رنين التوازى أيضًا تردد الرنين، ويرمز له بالرمز f_0 وقيمته كما في المعادلة الآتية :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ (Hz)} \qquad (4-66)$$

يبين الشكل ٤ – ٤٠ الخواص الترددية لدائرة رنين توازي L C .



الشكل ٤ – ٣٩ دائرة توازى L C



الشكل ٤ – ٤٠ الخواص الترددية لدائرة رنين توازي L C .

سؤال ٢١

نفترض أن حالة الرنين حدثت عند توصيل الجهد المتغير $V = 10\ (V)$ إلى دائرة توالى مكونة من $C = 25\ (\mu F)$, $L = 40\ (mH)$, $R = 1\ (\Omega)$

احسب تردد الرنين f_0 و معامل جودة الدائرة Q و التيار I و الجهود V_L ، V_C على الملف والمكثف .

سؤال٢٢

المعادلة (66 - 4) تعطى قيمة تردد الرنين f_0 لدائرة التوازى بشرط $\frac{1}{LC} >> (R/L)^2$

حيث R هى مقاومة الملف .

احسب ترددات رنين التوالي، ورنين التوازي إذا كانت

$R = 1\ (\Omega)$ ، $C = 25\ (\mu F)\ ,\ L = 40\ (mH)$.

٤ – ٤ القدرة فى دائرة التيار المتغير

فى دائرة التيار المتغير يمكن التعبير عن الجهد والتيار بدلالة القيم الفعالة . وفي دائرة التيار المستمر يعطينا حاصل ضرب الجهد في التيار القدرة المستهلكة . بينما في دائرة التيار المتغير يسمى حاصل ضرب القيم الفعالة للجهد والتيار (القدرة الظاهرة) لأنها ليست القدرة المستهلكة في الحمل التى تقل عن القدرة الظاهرة لوجود فرق طور بين الجهد والتيار .

في هذا الجزء سنقوم بدراسة القدرة في دائرة التيار المتغير الجيبى .

٤ – ٤ – ١ القدرة ومعامل القدرة Power factor في دائرة التيار المتغير

أ – التعبير عن القدرة

يبين الشكل ٤ – ٤١ (أ) جهد متغير جيبى يقوم بتغذية حمل مكون من دائرة توالى RL. والعلاقات بين التيار i والجهد υ على الحمل هي (كما في الفصل الثالث) :

$$\upsilon = \sqrt{2}\ V \sin \omega t \ \{V\}, \quad i = \sqrt{2}\ I \sin(\omega t - \phi)\ (A) \qquad (4-67)$$

$$I = \frac{V}{Z} \quad , \quad Z = |\dot{Z}| = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad , \quad \tan\phi = \frac{X_L}{R}$$

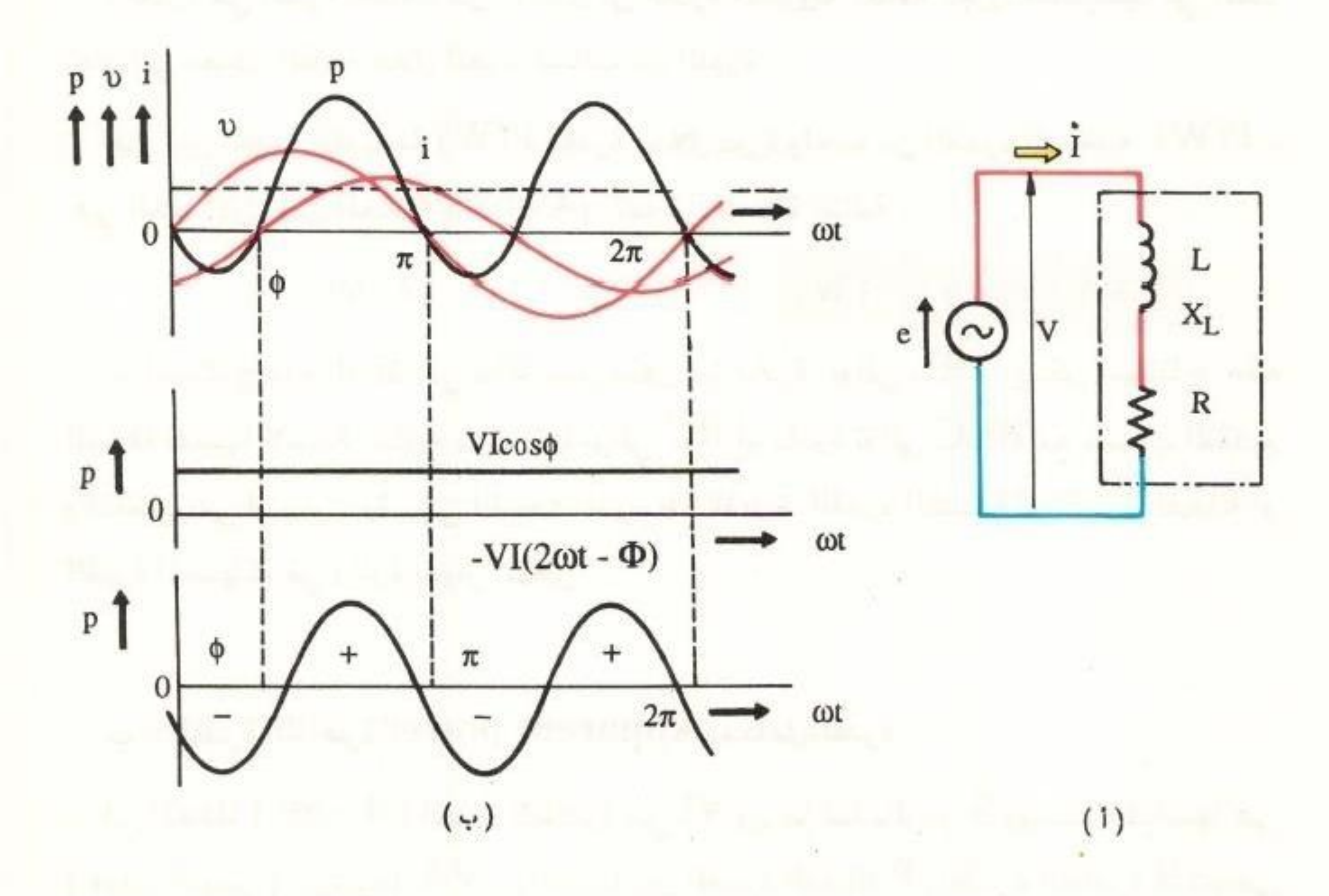
القـدرة اللحظيـة هى حاصل ضرب الجهد $\upsilon(V)$ فى التيار $i(A)$ كما يلى :

$$P = \upsilon i = \sqrt{2}\ V \sin \omega t \,.\, \sqrt{2}\ I \sin(\omega t - \phi)$$

$$= 2\, V I \sin \omega t \,.\, \sin(\omega t - \phi) = V I \cos\phi - V I \cos(2\omega t - \phi) \ (W) \qquad (4-68)$$

يحسب ذلك باستخدام التعويض $\alpha = \omega t \;,\; \beta = \omega t - \phi$ واستخدام معادلة الدوال المثلثية

$$2 \sin\alpha \sin\beta = \cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)$$



الشكل ٤ – ٤١ القدرة في دائرة التيار المتغير

يبين الشكل ٤ – ٤١ (ب) الأشكال الموجية للجهد V والتيار i والقدرة اللحظية P. الحد الأول في الطرف الأيمن للمعادلة (68 - 4) هو كمية ثابتة لاتعتمد على الزمن t وموضحة في الشكل ٤ – ٤١ (ب) . الحد الثانى في الطرف الأيمن للمعادلة (68 - 4) هو موجه جيبية أقصى قيمة لها (VI) وترددها يساوي ضعف تردد مصدر القدرة . والشكل الموجى لهذا الحد موضح أيضاً في الشكل ٤–٤١ (ب) وقيمته المتوسطة خلال دوره كاملة تساوي صفراً. حيث القدرة اللحظية هى مجموع هذين الحدين .

والقدرة في الجزء السالب من P تبين أن القدرة المخزونة كطاقة كهرومغناطيسية في الملف تعاد إلى مصدر القدرة خلال الجزء السالب من الدورة .

لهذا فإن القيمة المتوسطة P(W) للقدرة خلال دورة واحدة من القدرة اللحظية P(W) ، هي الحد الأول من المعادلة (68 - 4) كما في العلاقة التالية :

$$P = VI \cos \phi \quad (W) \qquad (4-69)$$

تم استنتاج هذه العلاقة في حالة حمل مكون من دائرة توالى RL . ويمكن استنتاج هذه العلاقة نفسها لأحمال مكونة من دائرة توالي RC أو دائرة توالى RLC مع حساب التقديم والتأخير في التيار . وتسمى القيمة المتوسطة للقدرة القدرة النشطة أو القدرة الفعالة أو القدرة المستهلكة في دائرة التيار المتغير .

ب – القدرة الظاهرة Apparent power ومعامل القدرة

في المعادلة (69 - 4) القدرة الظاهرة هي VI ويرمز لها بالرمز S ووحـــدة قياسها هى (ڤولت أمبير) ورمزها VA . والنسبة بين القدرة الفعالة P والقدرة الظاهرة S تسمى معامل القدرة ومعادلتها كمايلي:

$$\cos \phi = \frac{VI \cos \phi}{VI} = \frac{P}{S} \qquad (4-70)$$

عند استخدام حمل مكون من مقاومة فقط، فإن فرق الطور بين الجهد والتيار يساوى صفراً $\phi = 0$ (rad) ويكون $COS\ \phi = 1$. وعند استخدام حمل مكون من ملف L فقط أو مكثف C فقط، فإن فرق الطور بين الجهد والتيار يساوى $\frac{\pi}{2}$ (rad) ويكون $COS\ \phi = 0$.
وهذا يعني أن معامل القدرة تتراوح قيمته بين الصفر والواحد الصحيح . وعند التعبير عن هذه القيمة كنسبة مئوية تكون قيمتها بين صفر و100% . وفى حالة الدائرة الحثية يكون معامل القدرة متأخراً أما في حالة الدائرة السعوية (الشبيهة بالمكثف) فيكون معامل القدرة متقدماً .

ومن المعادلة (67 - 4) يمكن كتابة فرق الوجه بين الجهد والتيار بالعلاقة :

$$\tan\phi = \frac{X_L}{R}$$

وقيمة الممانعة Z هى $\sqrt{R^2 + X_L^2}$ وباستخدام هذه العلاقات يمكن استنتاج معامل القدرة في الصورة الآتية :

$$\cos\ \phi = \frac{R}{Z} \qquad (4 - 71)$$

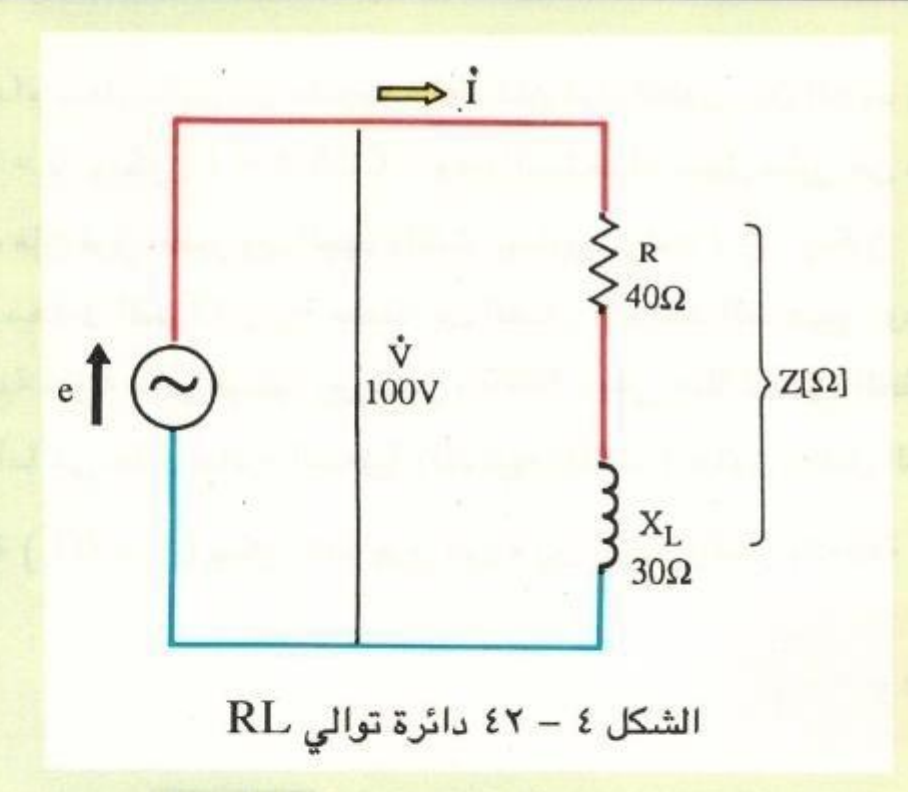
ويمكن استنتاج هذه المعادلة باستخدام الممانعة :

$$\dot{Z} = R + j X_L = Z(\cos\phi + j\sin\phi)$$

وتكون زاوية الممانعة ϕ هى زاوية معامل القدرة .

مثال٣

فى الشكل ٤ – ٤٢ يقوم جهد متغير قيمته$100(V)$ بتغذية حمل مكون من دائرة توالى $X_L = 30\ (\Omega), R = 40\ (\Omega)$. احسب معامل القدرة للحمل؛ واحسب القدرة الفعالة .



الشكل ٤ – ٤٢ دائرة توالي RL

الحل

الممانعة Z فى هذه الدائرة هى : $Z = \sqrt{(40)^2 + (30)^2} = 50\,\Omega$

معامل القدرة هو : $\cos\phi = \frac{R}{Z} = \frac{40}{50} = 0.8 = 80\,\%$

التيار I هو : $I = \frac{V}{Z} = \frac{100}{50} = 2\ A$

القدرة الفعالة هى : $P = V I \cos\phi = 100 \times 2 \times 0.8 = 160\ W$

سؤال ٢٣

يقوم جهد متغير قيمته 100(V) بتغذية دائرة، فيمر فيها تيار قيمته 8(A) ، وكان معامل القدرة للحمل هو 80% . احسب القدرة الفعالة P والقدرة الظاهرة S .

سؤال ٢٤

يقوم جهد متغير قيمته 100(V) بتغذية دائرة ، فيمر فيها تيار قيمته 5(A) والقدرة المستهلكة في الحمل هى 400(V) . احسب معامــل القـدرة $\cos \phi$ والممانعة Z ، والمقاومة R، ومفاعلة الحمل X_L .

٤ – ٤ – ٢ العلاقة بين القدرة الظاهرة والقدرة الفعالة Active power وغير الفعالة في دائرة توالى RL

فى الشكل ٤ – ٤١ (أ) يمكن كتابة التيار i بدلالة الأعداد المركبة كمايلي :

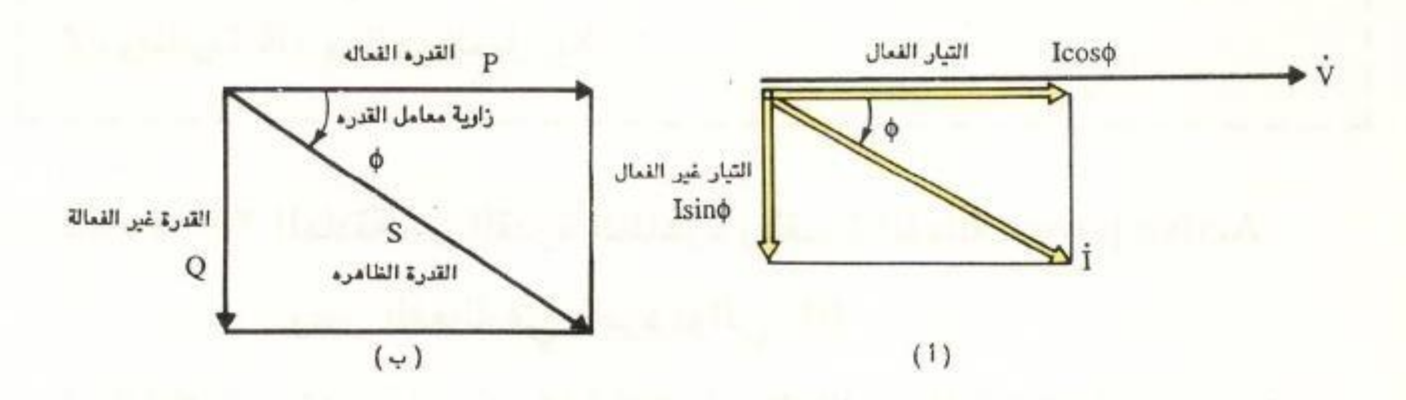
$$\dot{I} = I \in^{j(-\phi)} = I(\cos\phi - j\sin\phi) \quad (A) \qquad (4-72)$$

ويبين الشكل ٤ – ٤٣ (أ) رسم المتجهات للعـلاقة السابقة بالقياس إلى الجـهد. والتيـار ($I \cos \phi$)، الذى له الوجه نفسه مثل الجهد V في رسم المتجهات، هو الجزء الفعال من التيار . أما التيار ($I \sin \phi$) والذي يتأخر بزاوية $\pi / 2(rad)$ عن الجهد فهو الجـزء غيـر الفعـال مـن التيار وحاصل ضرب الجهد V في الجزء الفعال ($I \sin \phi$) من التيار يعطي القدرة الفعالة . أما حاصل ضرب الجهد V في الجزء غيـر الفعـال ($I \sin \phi$) من التيار فيعطى القدرة غيـر الفعـاله ، التي يرمز لها بالرمز Q ووحدة قياسها ڤولت أمبير غير فعال، ويرمز لها بالرمز var .

$$\left.\begin{array}{lll} P = VI\cos\phi = I^2 R & (W) & \text{القدرة الفعالة} \\ Q = VI\sin\phi = I^2 X_L & (var) & \text{القدرة غير الفعالة} \end{array}\right\} \quad (4-73)$$

ويلاحظ أن معـامل القـدرة ($\cos \phi$) هـو النسبـة بين القدرة الفعـالة P والقـدرة الظاهرة S أما معامل القدرة غيـر الفعـالة ($\sin \phi$) فهو النسبة بين القدرة غيـر الفعـالة Q والقدرة الظاهرة S .

ويمكن استنتاج المعادلة الآتية من المعادلة السابقة (73 - 4) :



الشكل ٤ – ٤٣ متجهات التيار والجهد والقدرة في دائرة توالي RL .

$$P^2 + Q^2 = (V I \cos\phi)^2 + (V I \sin\phi)^2$$

$$= V^2 I^2 (\cos^2\phi + \sin^2\phi) = V^2 I^2 = S^2$$

أي إن القدرة الظاهرة تحقق العلاقة :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (VA) \qquad (4 - 74)$$

القدرة الظاهرة = $\sqrt{\text{(القدرة الفعالة)}^2 + \text{(القدرة غير الفعالة)}^2}$

وطبقا للمعادلة (74 - 4) فإن الشكل ٤–٤٣ (ب) يبين رسم متجهات القدرة . ويشبه ذلك رسم المتجهات في الشكل ٤ – ٤٣ (أ) .

سؤال٢٥

يقوم جهد متغير قيمته (V) 100 بتغذية دائرة توالى مكونة من مقاومة $R = 6(\Omega)$ ومفاعلة حثية $X_L = 8\ (\Omega)$. احسب التيار I المار في الحمل ومعامل القدرة $(\cos\phi)$ والقدرة الفعالة P والقدرة غير الفعالة Q والقدرة الظاهرة S .

٤ – ٥ التيار المتغير ثلاثى الأوجه Three phase AC

يستخدم التيار المتغير ثلاثى الأوجه في المصانع والمؤسسات التى تستهلك كميات كبيرة من القدرة الكهربية، وذلك لإمكانية نقل القدرة العالية بصورة اقتصادية وتغذية محرك الحث باستخدام التيار المتغير ثلاثى الأوجه كمصدر قدرة . وفى هذا الفصل نقوم بدراسة الخواص الرئيسة للتيار المتغير ثلاثى الأوجه وحساب الدوائر وتحليل المجال المغناطيسي لهذا النوع من التيار .

٤ – ٥ – ١ التيار المتغير ثلاثي الأوجه

أ – توليد التيار المتغير ثلاثى الأوجه

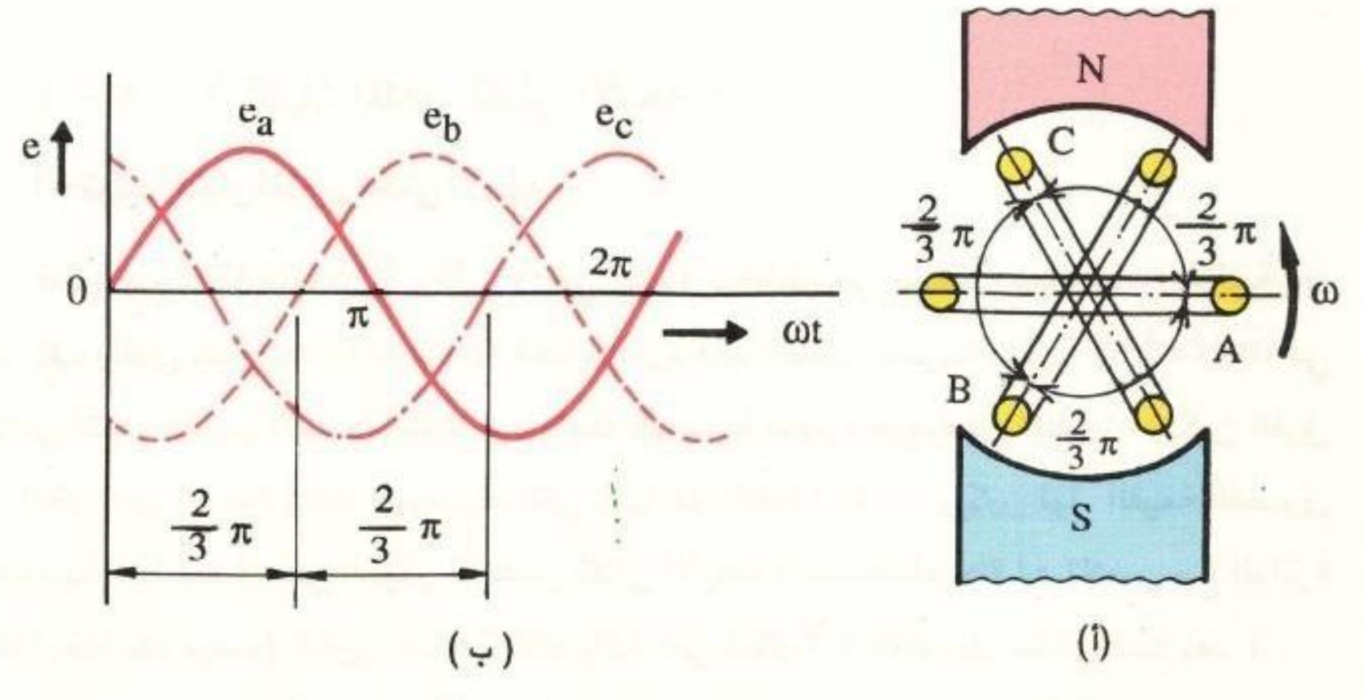
عند وضع ثلاثة ملفات A , B , C في مجال مغناطيسى منتظم بحيث تكون الزاوية بين كل ملف والذى يليه $2\pi/3$ (rad) وإذا قمنا بإدارة هذه الملفات بسرعة دائرية ω (rad/s) في عكس اتجاه عقارب الساعة تتولد قوة دافعة كهربائية متغيرة جيبية في الملفات ، ويكون الفرق في الطور بين كل قوة دافعة كهربائية والتى تليها هو $2\pi/3$ (rad) ، ويكون لها القيمة القصوى نفسها . ونحصل على التيار المتغير ثلاثى الأوجه باستخدام حلقات تلامس مع الدائرة الخارجية بعد توصيل القوى الدافعة الكهربائية على شكل Y (التفاصيل ستأتي فيما بعد).

وتتولد القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة ثلاثية الأوجه باستخدام مولد متزامن ثلاثى الأوجه .

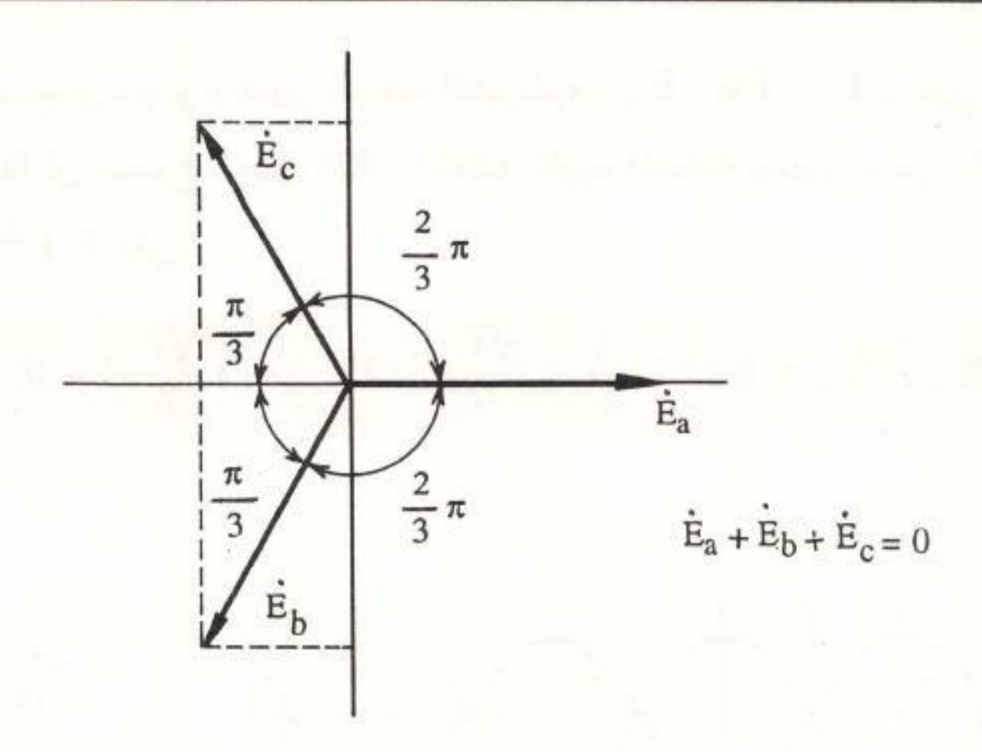
نفترض أن القيمة الفعالة للقوة الدافعة الكهربائية في كل ملف هى $E(V)$ وأن السرعة الدائرية هى ω (rad/s) وأن القوة الدافعة الكهربائية e المتولدة في الملف A هى أساس القياس، فيمكن كتابة القوى الدافعة الكهربائية e_a , e_b , e_c (V) فى الملفات الثلاثة بالمعادلات الآتية والأشكال الموجية كما في الشكل ٤ – ٤٤ (ب) .

$$\left.\begin{aligned} e_a &= \sqrt{2}\ E \sin \omega t \quad (V) \\ e_b &= \sqrt{2}\ E \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (V) \\ e_c &= \sqrt{2}\ E \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (V) \end{aligned}\right\} (4-75)$$

وفى المعادلة (75 - 4) نجد أن تسلسل القيمة القصوى للقوى الدافعة الكهربائية في الملفات تعطي الترتيب e_a ثم e_b ثم e_c . وهذا الترتيب يسمى تسلسل زاوية الوجه أو دوران الزاوية.



الشكل ٤ – ٤٤ توليد التيار المتغير ثلاثي الأوجه المتماثل .



الشكل ٤ – ٤٥ رسم المتجهات للتيار المتغير ثلاثي الأوجه المتماثل .

بافتراض أن القوى الدافعة الكهربائية ثلاثية الأوجه المتماثلة فى كل ملف على الترتيب هي $\dot{E}_a$ ثم $\dot{E}_b$ ثم $\dot{E}_c$ وافتراض أن زاوية الطور الابتدائية للقوة الدافعة $\dot{E}_a$ (V) هى O(rad) نحصل على المعادلة (4-76) . ويبين الشكل (٤ – ٤٥) رسم المتجهات لهذه المعادلات .

$$\dot{E}_a = E \in^{jo} = E$$

$$\dot{E}_b = E \in^{j(-2\pi/3)} = E \{ \cos(\frac{-2\pi}{3}) + j \sin(\frac{-2\pi}{3}) \} = E(\frac{-1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}) \quad (4-76)$$

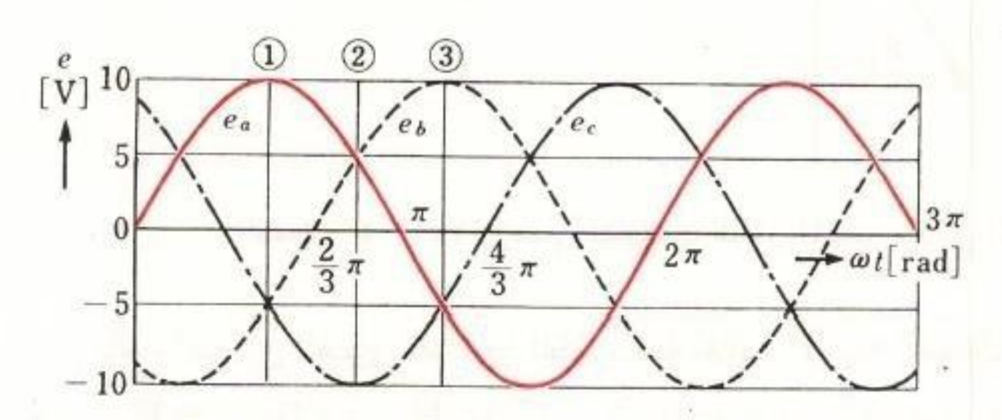
$$\dot{E}_c = E \in^{j(-4\pi/3)} = E \{ \cos(\frac{-4\pi}{3}) + j \sin(\frac{-4\pi}{3}) \} = E(\frac{-1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})$$

ب – جمع القيم اللحظية Instantaneous values للتيار المتغير ثلاثى الأوجه

يبين الشكل ٤ – ٤٦ أن مجموع القيم اللحظية للقوى الدافعة الكهربائيـة المتغـيرة ثلاثية الأوجه e_a ، e_b ، e_c عند أية لحظة يساوي صفراً ، وهذا يتفق مع رسم المتجهات في الشكل

٤ – ٤٥ الذى يوضح أن مجموع القوى الدافعة الكهربائية $\dot{E}_a$, $\dot{E}_b$, $\dot{E}_c$ يساوي صفراً .
ويمكن تأكيد حقيقة أن مجموع الجهود المتغيرة ثلاثية الأوجه المتماثلة يساوى صفرا بالاستعانة بالمعادلة (76 - 4) كمايلي :

$$\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = E + E\left(\frac{-1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + E\left(\frac{-1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = 0 \qquad (4-77)$$



الشكل ٤ – ٤٦ القيمة اللحظية للجهد المتغير ثلاثي الأوجه .

مثال٤

احسب مجموع الجهود e_a , e_b , e_c طبقًا للمعادلة (75 - 4) واستخدام العلاقة

$$\sin(\alpha - \beta) = \sin\alpha\ \cos\beta - \cos\alpha\ \sin\beta$$

الحـل

$$e_a + e_b + e_c = \sqrt{2}\ E\left\{\sin\omega t + \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)\right\}$$

$$= \sqrt{2}\ E \{ \sin \omega t + (\sin \omega t \cos \frac{2\pi}{3} - \cos \omega t \sin \frac{2\pi}{3})$$

$$+ (\sin \omega t \cos \frac{4\pi}{3} - \cos \omega t \sin \frac{4\pi}{3}) \}$$

$$e_a + e_b + e_c = \sqrt{2}\ E \{ \sin \omega t + (\frac{-1}{2} \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t) + (\frac{-1}{2} \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t) \}$$

$$= \sqrt{2}\ E (\sin \omega t - \sin \omega t) = 0$$

من مثال ٤ يتبين أن مجموع القيم اللحظية للقوى الدافعة الكهربائية المتغيرة ثلاثية الأوجه عند أية لحظة يساوي صفراً . وبالمثل مجموع القيم اللحظية للتيارات المتغيرة ثلاثية الأوجه عند أية لحظة يساوي صفراً .

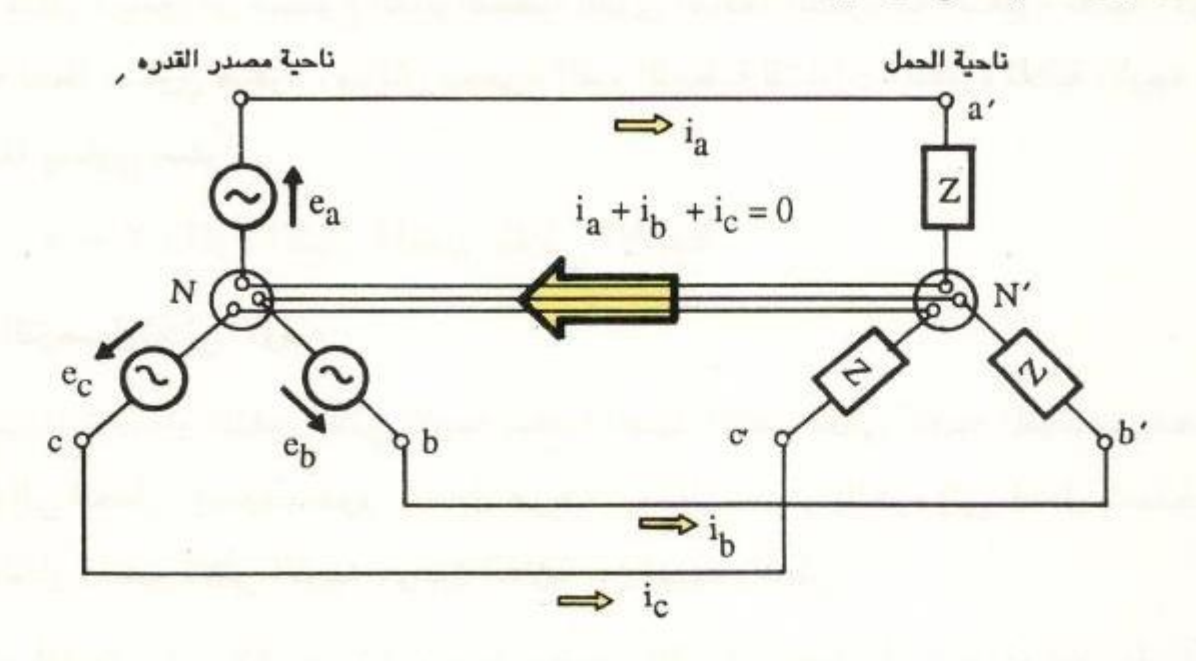
٤ – ٥ – ٢ دائرة التيار المتغير ثلاثي الأوجه

أ – التوصيل ثلاثي الأوجه

تقوم دائرة التيار المتغير ثلاثي الأوجه بتغذية الجهد المتغير ثلاثى الأوجه المتولد من مصدر القدرة إلى الحمل . وسوف نقوم بتحليل طريقة توصيل مصدر القدرة إلى الحمل باستخدام دائرة التيار المتغير ثلاثى الأوجه . ونبين العلاقة بين الجهد والتيار .

ويبين الشكل ٤ – ٤٧ طريقة توصيل مصدر القدرة بالحمل باستخدام توصيل Y أو توصيل النجمة . وقيم القوى الدافعة الكهربائية للأوجه الثلاثة متساوية، والفرق في الوجه بين كل قوة دافعة كهربائية والتى تليها يساوي $2\pi/3$ (rad) . فإذا كانت ممانعة كل وجه في الحمل تساوى ممانعة الوجه الآخر فإن قيمة التيار المار في كل وجه من الحمل يساوى قيمة التيار المار في الأوجه الأخرى، وفرق الطور بين التيار المار في أحد أوجه الحمل والوجه الذى يليه يساوى $2\pi/3$ (rad) . والحمل الذى له الممانعة نفسها في كل من الأوجه الثلاثة يسمى حملاً متوازناً ثلاثي الأوجه .

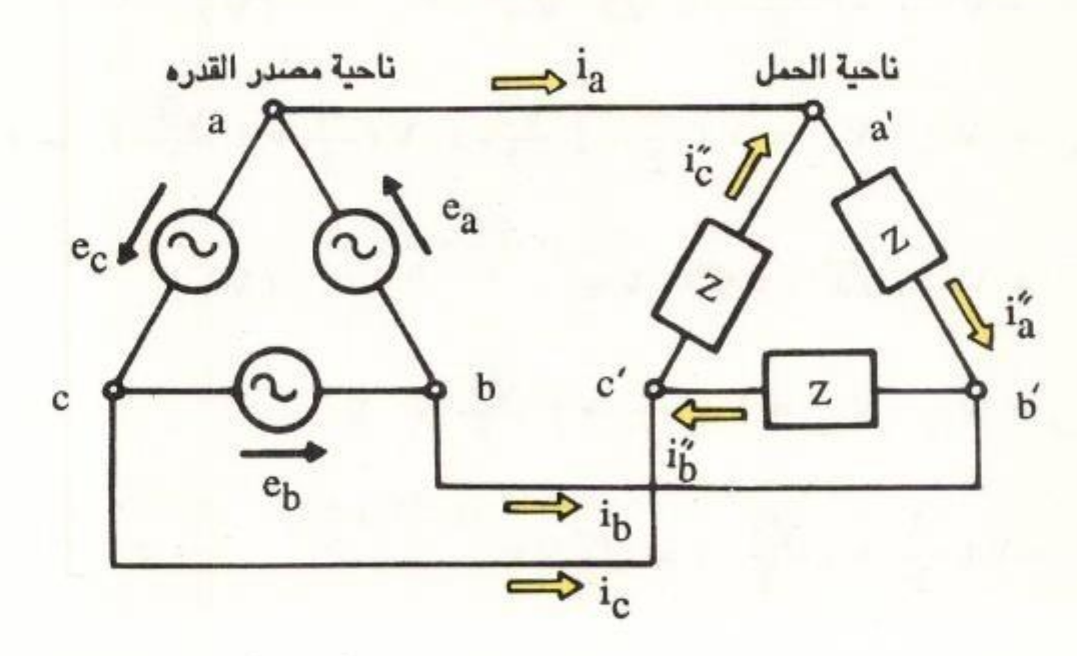
الخطوط الثـلاثة (NN') التى ترجع من الحـمل إلى مـصـدر القـدرة تحـمل مـجـمـوع التيــارات ($i_a + i_b + i_c$) المارة في كل وجه . وهذا المجموع هو مجموع القيم اللحظية للتيار المتغير ثلاثى الأوجه وهو يساوي صفرًا كما وضحنا من قبل . وعلى هذا فإن هذه الخطوط الثلاثة يمكن إزالتها لأن النقطتين N , N' لهما الجهد نفسه. وتعدّ كل من النقطتين N , N' نقطة تعادل ، والخط N , N' يسمى موصلاً متعادلاً . والدائرة التي بها موصل متعادل تسمى نظامًا ثلاثي الأوجه رباعي الأسلاك . والدائرة التى ليس بها موصل متعادل تسمى نظامًا ثلاثي الأوجه ثلاثي الأسلاك . واذا استخدمنا طريقة توصيل Y عند كل من مصدر القدرة والحمل فإن ذلك يسمى توصيل Y - Y .



الشكل ٤ – ٤٧ طريقة توصيل Y - Y

أما الشكل ٤ – ٤٨ فيبين طريقة توصيل دلتا أو توصيل المثلث . وفى هذه الطريقة يتم توصيل كل من مصدر القدرة والحمل داخليًا بطريقة دائرية، ثم توصل الأطراف الخارجية في كل من مصدر القدرة والحمل كل طرف بنظيره في الناحية الأخرى . وطريقة توصيل دلتا – دلتا تتطلب استخدام توصيل دلتا في كل من مصدر القدرة والحمل .

بالإضافة إلى ذلك يوجد أيضا طريقة توصيل Δ - Y وطريقة توصيل Y - Δ .



الشكل ٤ – ٤٨ توصيل $\Delta - \Delta$

ب – دائرة توصيل Y - Y

(١) جهد الوجه وجهد الخط

يبين الشكل ٤ – ٤٩ (أ) دائرة توصيل Y - Y حيث جهد الوجه هو القوة الدافعة الكهربائية $\dot{E}_a$ بين الطرفين (a , N) والقوة الدافعة الكهربائية $\dot{E}_b$ بين الطرفين (b, N) والقوة الدافعة الكهربائية $\dot{E}_c$ بين الطرفين (c ,N) في مصدر القدرة . هناك أيضاً الجهد $\dot{V}_a$ بين الطرفين (a' , N') والجهد $\dot{V}_b$ بين الطرفين (b' , N') والجهد $\dot{V}_c$ بين الطرفين (c' , N') فى الحمل . أما جهد الخط فهو الجهد $\dot{V}_{ab}$ بين الطرفين (a , b) والجهد $\dot{V}_{ca}$ بين الطرفين (c , a) والجهد $\dot{V}_{bc}$ بين الطرفين (b , c) .

ويمكن استنتاج العلاقة بين جهد الوجه وجهد الخط باستخدام القانون الثانى لكيرشوف :

$$\dot{V}_{ab} = \dot{V}_a - \dot{V}_b = V - V\left(\frac{-1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$= V\left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \sqrt{3}\ V \in^{j\left(\frac{\pi}{6}\right)} \quad (V)$$

$$\dot{V}_{bc} = \dot{V}_b - \dot{V}_c = V\left(\frac{-1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - V\left(\frac{-1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \quad (4-78)$$

$$= V(-j\sqrt{3}) = \sqrt{3}\ V \in^{j\left(\frac{-2\pi}{3} + \frac{\pi}{6}\right)} \quad (V)$$

$$\dot{V}_{ca} = \dot{V}_c - \dot{V}_a = V\left(\frac{-1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - V$$

$$= V\left(\frac{-3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \sqrt{3}\ V \in^{j\left(\frac{-4\pi}{3} + \frac{\pi}{6}\right)} \quad (V)$$

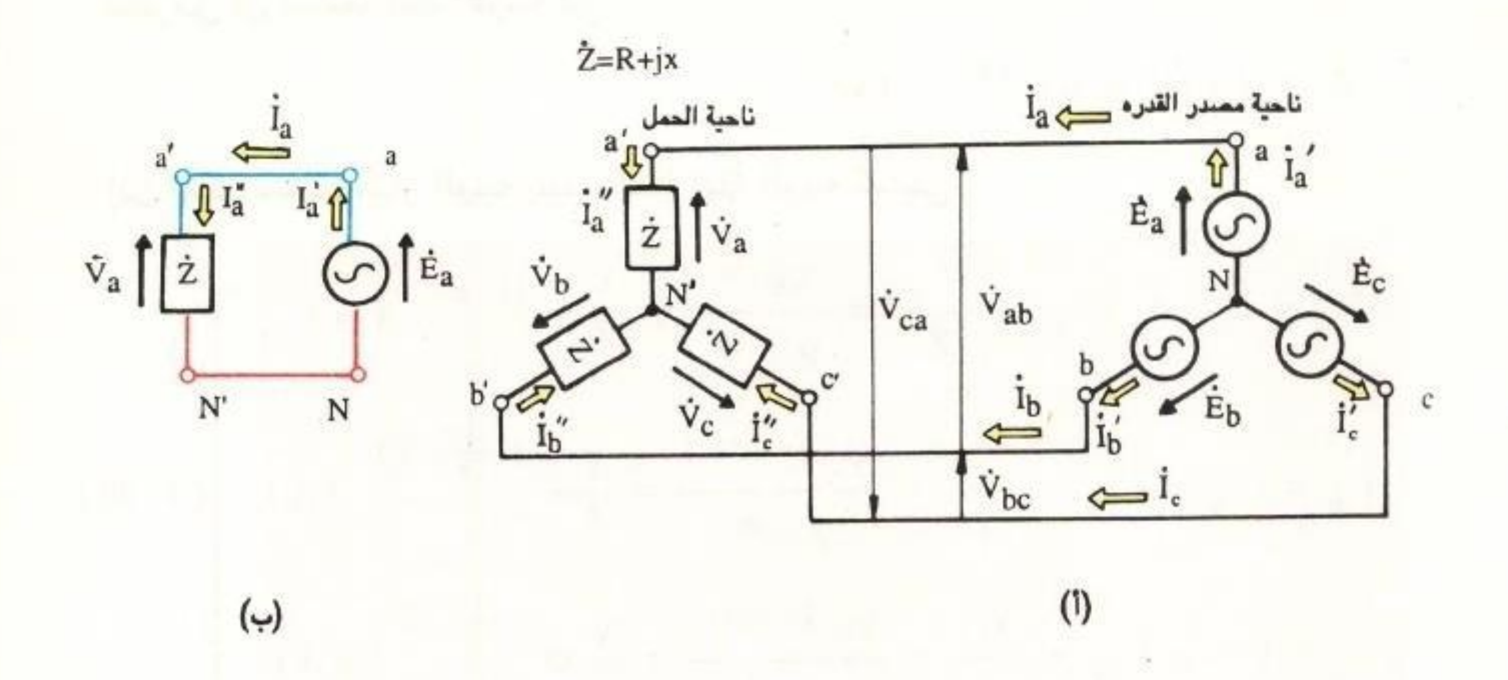
ويمكن استنتاج أيضاً الجزء الخاص بالجهد في رسم المتجهات كما في الشكل ٤ – ٥٠ (أ) عن طريق رسم شكل متجهات جهود الوجه، ثم وضع جهود الخط طبقا للمعادلة (78 - 4) .

* لاحظ أن اتجاه جهد الخط هو الاتجاه من الحرف الثانى إلى الحرف الأول في رمز الجهد . فمثلاً اتجاه جهد الخط V_{ab} هو من (b)إلى (a) .

إذا افترضنا أن قيمة جهد الخط هي V_{ℓ} (V) وقيمة جهد الوجه هي Vp { V } فإن العلاقة بينهما هي :

$$V_{\ell} = \sqrt{3}\ V_p \quad (V) \qquad (4-79)$$

وطبقًا للمعادلة (78 - 4) أو الشكل ٤ – ٥٠ (أ) فإن وجه جهد الخط في دائرة توصيل Y - Y يتقدم على جهد الوجه بمقدار (rad) $\pi / 6$.



الشكل ٤ – ٤٩ دائرة توصيل Y - Y

وجهد الخط V_ℓ وجهد الوجه V_p هى كما يلى :

$$|\dot{V}_{ca}| = |\dot{V}_{ab}| = |\dot{V}_{bc}| = V_\ell \quad , \quad |\dot{V}_a| = |\dot{V}_b| = |\dot{V}_c| = V_p$$

(٢) تيار الوجه وتيار الخط

في دائرة توصيل Y - Y المبينة في الشكل ٤–٤٩(أ) تسمى التيارات $\dot{I}'_a , \dot{I}'_b , \dot{I}'_c$ المارة في مصدر القدرة والتيارات ($\dot{I}''_a , \dot{I}''_b , \dot{I}''_c$) المارة في الحمل بتيارات الوجه . أما التيارات ($\dot{I}_a , \dot{I}_b , \dot{I}_c$)المارة في خطوط التوصيل من أطراف مصدر القدرة وأطراف الحمل فتسمى تيارات الخط . وعند توصيل Y - Y كما بالشكل ٤ – ٤٩ (أ) لايوجد لتيار الوجه ولتيار الخط فرعًا بين N , 'N لجعل القيمتان متساويتان وزاويتا الوجه متساويتان .

لنفترض أن ممانعة أحد الأوجه هي :

$$\dot{Z} = R + jX = Z\in^{j\phi} \quad (\Omega)$$

إذن يمكن حساب تيار الوجه وتيار الخط لهذا الوجه كمايلي :

$$\left.\begin{aligned}
\dot{I}_a &= \dot{I}'_a = \dot{I}''_a = \frac{\dot{V}_a}{\dot{Z}} = \frac{V\in^{jo}}{Z\in^{j\phi}} = \frac{V}{Z}\in^{j(-\phi)} \quad (A) \\
\dot{I}_b &= \dot{I}'_b = \dot{I}''_b = \frac{\dot{V}_b}{\dot{Z}} = \frac{V\in^{j(-2\pi/3)}}{Z\in^{j\phi}} = \frac{V}{Z}\in^{j(\frac{-2\pi}{3}-\phi)} \quad (A) \\
\dot{I}_c &= \dot{I}'_c = \dot{I}''_c = \frac{\dot{V}_c}{\dot{Z}} = \frac{V\in^{j(-4\pi/3)}}{Z\in^{j\phi}} = \frac{V}{Z}\in^{j(\frac{-4\pi}{3}-\phi)} \quad (A)
\end{aligned}\right\} \quad (4-80)$$

حيث Z , ϕ كالآتي :

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (\Omega) \;, \quad \tan\phi = X/R$$

فى دائرة توصيل $Y - Y$ إذا كانت قيمة تيار الوجـه هى $I_p(A)$ وقيمة تيار الخط هي $I_\ell(A)$ وقيمة جهد الوجه هى $V_p(V)$ وقيمة ممانعة الحمل هى $Z\ (\Omega)$ فإن العلاقة بين هذه الكميات تكون كمايلى :

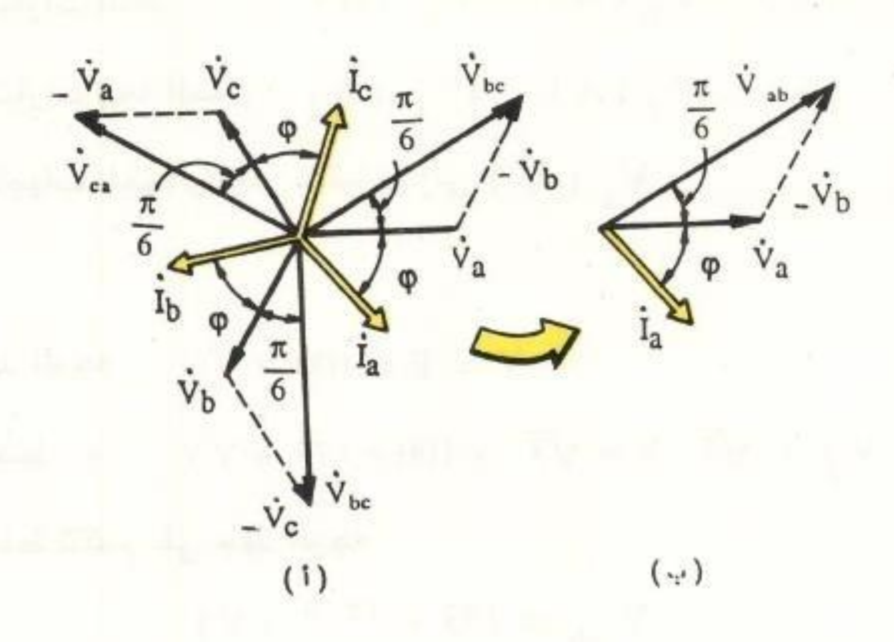
$$I_\ell = I_p = V_p / Z \qquad (4-81)$$

حيث إن تيار الوجه له زاوية وجه تيار الخط نفسها، وتيار الوجه يتأخر عن جهد الوجه بزاوية مقدارها ϕ (زاوية الممانعة) . إذا كان الحمل سعويًا فإن ϕ تكون سالبة ويتقدم التيار على الجهد . وإذا كان تيار الخط هو I_ℓ وتيار الوجه هو I_p فإن :

$$|\dot{I}_a| = |\dot{I}_b| = |\dot{I}_c| = I_\ell \,,$$

$$|\dot{I}'_a| = |\dot{I}'_b| = |\dot{I}'_c| = |\dot{I}''_a| = |I''_b| = |\dot{I}''_c| = I_p$$

وعند استخدام حمل متوازن في دوائر التيار المتغير ثلاثي الأوجه المتماثل كما في الشكل ٤- ٤٩ (ب) فإن قيمة (I_ℓ) وزاوية (ϕ) لتيار الخط I_a يمكن حسابها باستخدام دائرة وجه واحد بها خط التعادل الواصل بين نقطتي التعادل N' , N .



الشكل ٤ – ٥٠ رسم المتجهات لتوصيل Y - Y .

ويمكن استنتاج رسم المتجهات الخاص بالمعادلة (4-80) بسهولة إذا علمنا أن تيار الخط $\dot{I}_b$ يتأخر بزاوية عن $\dot{I}_a$ وتيار الخط $\dot{I}_c$ يتأخر بالزاوية نفسها عن $\dot{I}_b$.

مثال ٥

يبين الشكل ٤ – ٥١ دائرة توصيل Y - Y بها حمل متوازن ومصدر قدرة ثلاثي الأوجه متوازن . حيث جهد الوجه هو : $E_a = \dot{V}_a = 100 \in^{j0}$ (V)

وممانعة الحمل هي : $\dot{Z} = 5\sqrt{3} + j5 \ (\Omega)$

أجب عن الأسئلة الآتية :

(١) احسب جهود الخط $\dot{V}_{ab}(V)$, $\dot{V}_{bc}(V)$, $\dot{V}_{ca}(V)$

(٢) احسب تيارات الخط $\dot{I}_{a}(A)$, $\dot{I}_{b}(A)$, $\dot{I}_{c}(A)$

(٣) احسب تيارات وجه الحمل $\dot{I}''_{a}(A)$, $\dot{I}''_{b}(A)$, $\dot{I}''_{c}(A)$

(٤) ارسم متجهات الجهد والتيار بالقياس إلى $\dot{V}_a\ (V)$

الحـل

(١) قيمة جهد الوجه : $V = E = 100\ (V)$

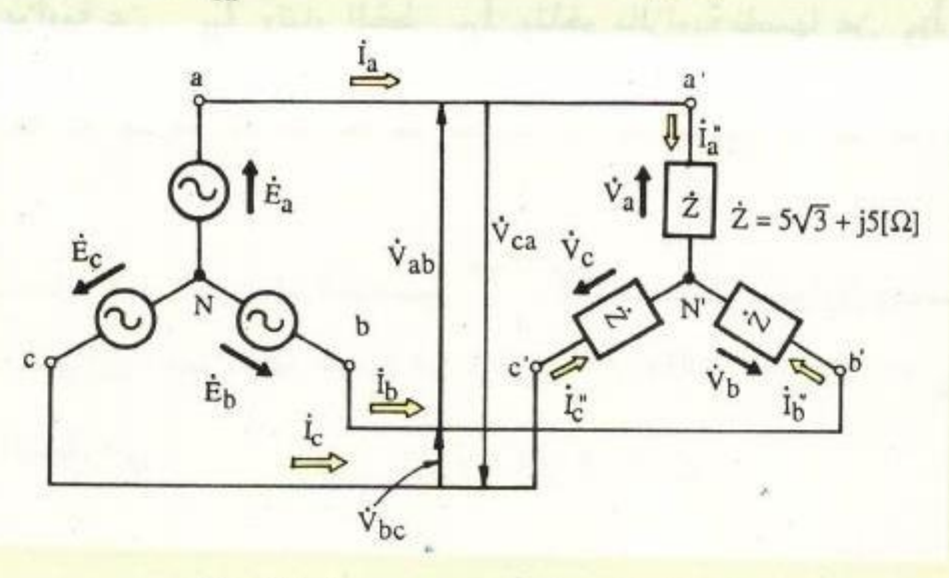
قيمة جهد الخط : $V_l = \sqrt{3}\ V = \sqrt{3} \times 100 = 173\ (V)$

زاوية تيار الخط تتقدم على جهد الوجه

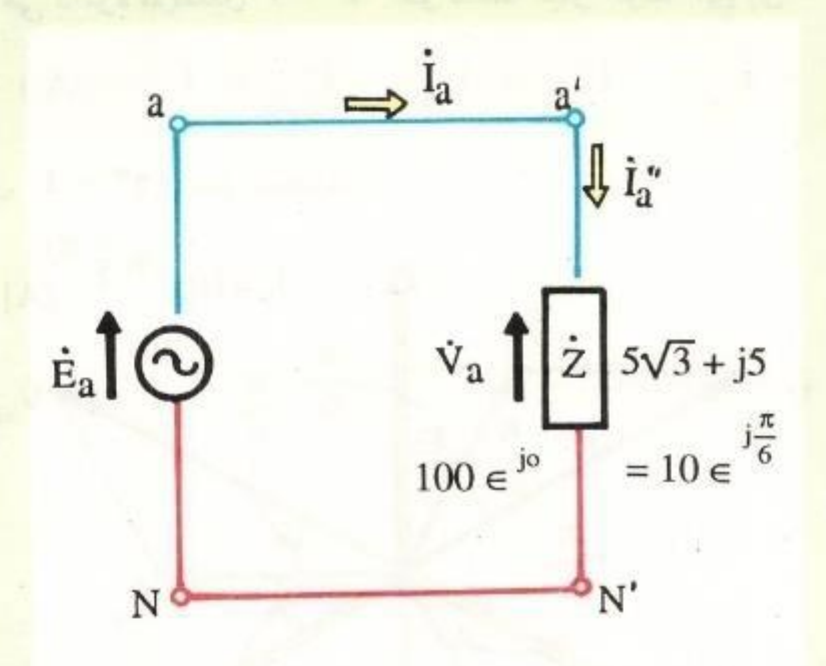
$$\dot{V}_{ab} = 173 \in^{j\pi/6}\ (V)$$

$$\dot{V}_{bc} = 173 \in^{j(\frac{-2\pi}{3} + \frac{\pi}{6})}\ (V)$$

$$\dot{V}_{ca} = 173 \in^{j(\frac{-4\pi}{3} + \frac{\pi}{6})}\ (V)$$



الشكل ٤ – ٥١ دائرة توصيل Y - Y



الشكل ٤ – ٥٢ دائرة وجه واحد

(٢)

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(5\sqrt{3})^2 + (5)^2} = 10 \ \Omega$$

$$\tan\phi = \frac{1}{\sqrt{3}} \longrightarrow \phi = \frac{\pi}{6} \text{ rad}$$

$$\dot{Z} = 10 \in^{j\pi/6} \ (\Omega) , \quad \dot{I}_a = \frac{\dot{V}_a}{\dot{Z}} = \frac{100 \in^{jo}}{10 \in^{j\pi/6}} = 10 \in^{j(-\pi/6)} \quad (A)$$

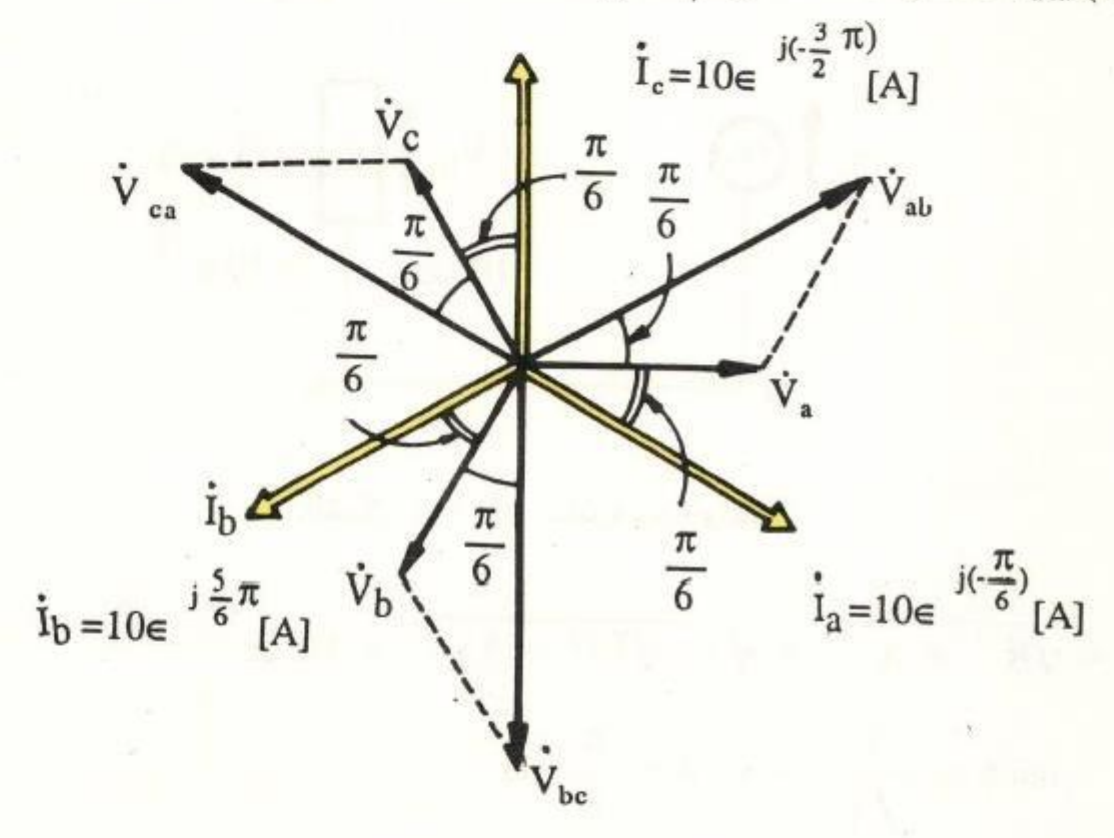
$$\dot{I}_b = 10 \in^{j\left(\frac{-2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right)} = 10 \in^{j\left(\frac{-5\pi}{6}\right)} \quad (A)$$

$$\dot{I}_c = 10 \in^{j\left(\frac{-4\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right)} = 10 \in^{j\left(-\frac{3}{2}\pi\right)} \quad (A)$$

(٣) تيار الخط في دائرة توصيل Y - Y هو نفسه تيار الوجه أي إن :

$$\dot{I}''_a = \dot{I}_a \quad , \quad \dot{I}''_b = \dot{I}_b \quad , \quad \dot{I}''_c = \dot{I}_c \quad (A)$$

(٤) يبين الشكل ٤ – ٥٣ رسم المتجهات



الشكل ٤ – ٥٣ رسم المتجهات

سؤال٢٦

فى دائرة توصيل Y - Y ممانعة الحمل قيمتها $\dot{Z} = 30 + j40\ (\Omega)$
وجهد الخط $200(V)$. احسب قيمة وزاوية تيار الخط وارسم متجهات الجهد والتيار .

حـ - دائرة توصيل دلتا - دلتا ($\Delta - \Delta$) Delta-Delta connection circuit

(١) جهد الوجه وجهد الخط

فى دائرة توصيل دلتا - دلتا يوصل الحمل المتوازن مع القوى الدافعة الكهربائية ثلاثية الأوجه كما في الشكل ٤ - ٥٤ (أ) .

ويمكن كتابة جهود الخط $\dot{V}_{ca}(V)$, $\dot{V}_{bc}(V)$, $\dot{V}_{ab}(V)$ وجهود الوجه $\dot{V}_{c}(V)$, $\dot{V}_{b}(V)$, $\dot{V}_{a}(V)$ كما يلي:

$$\dot{V}_{ab} = \dot{V}_{a} = \dot{E}_{a}, \ \dot{V}_{bc} = \dot{V}_{b} = \dot{E}_{b}, \ \dot{V}_{ca} = \dot{V}_{c} = \dot{E}_{c} \qquad (4-82)$$

وفى توصيل دلتا - دلتا تكون قيمة جهد الخط V_{ℓ} مساوية لقيمة جهد الوجه V_p وتكون زاوية جهد الخط مساوية لزاوية جهد الوجـه، ونحصل على العلاقة الآتية :

$$V_{\ell} = V_p \ (V) \qquad (4-83)$$

(٢) تيار الوجه وتيار الخط

عند استخدام توصيل الدلتا في كل من مصدر القدرة والحمل فإن :

$$\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = 0 \ , \ \dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c = 0$$

ولايوجد تيار دائرى في الدائرة المغلقة الناتجة من توصيل الدلتا في كل من مصدر القدرة والحمل . ويمكن حساب قيمة تيارات الوجه $\dot{I}'_c(A)$, $\dot{I}'_b(A)$, $\dot{I}'_a(A)$ فى مصدر القدرة وتيارات الوجه $I''_c(A)$, $I''_b(A)$, $I''_a(A)$ في الحمل على أساس تحليل دائرة الوجه الواحد المبينة في الشكل ٤ - ٥٤ (ب) .

$$\left.\begin{aligned}
\dot{I}'_a &= \dot{I}''_a = \frac{\dot{E}_a}{\dot{Z}} = \frac{\dot{V}_a}{Z\epsilon^{j\phi}} = \frac{V}{Z}\epsilon^{j(-\phi)} = I\epsilon^{j(-\phi)} \\
\dot{I}'_b &= I''_b = \frac{\dot{E}_b}{\dot{Z}} = \frac{\dot{V}_b}{Z\epsilon^{j\phi}} = \frac{V}{Z}\epsilon^{j(\frac{-2\pi}{3}-\phi)} = I\epsilon^{j(\frac{-2\pi}{3}-\phi)} \quad (A)
\end{aligned}\right\} (4-84)$$

$$\dot{I}'_c=\dot{I}''_c=\frac{\dot{E}_c}{\dot{Z}}=\frac{\dot{V}_c}{Z\in^{j\phi}}=\frac{V}{Z}\in^{j(-\frac{4}{3}\pi-\phi)}=I\in^{j(-\frac{4}{3}\pi-\phi)}\ (A)$$

حيث $\dot{Z}=R+jX=Z\in^{j\phi}\ ,\ Z=\sqrt{R^2+X^2}\ \ (\Omega)\ ,\ \tan\phi=X/R$

وإذا كانت قيمة تيار الوجه هى $I_p(A)$ وقيمة جهد الوجه هى $V_p(V)$ فإن العلاقة بينهما تكون كمايلي :

$$I_p=\frac{V_p}{Z} \qquad (4-85)$$

حيث تتأخر زاوية تيار الوجه عن زاوية جهد الوجه بمقدار زاوية الممانعة ϕ .

ويبين الشكـل ٤-٥٤(ج) كيفية استنتاج تيارات الخط $\dot{I}_a(A)$, $\dot{I}_b(A)$, $\dot{I}_c(A)$ فى دائرة توصيل دلتا - دلتا عن طريق ازدواج الخط على أساس توصيل أطراف مصدر القدرة a , b ,c إلى الأطراف المناظرة في الحمل a' , b' , c' ، وتكون معادلة تيار الخط كمايلي :

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}_a&=\dot{I}'_a-\dot{I}'_c=\dot{I}''_a-\dot{I}''_c=I\in^{j(-\phi)}-I\in^{j(\frac{-4\pi}{3}-\phi)}\\&=\sqrt{3}\ I\in^{j(\frac{-\pi}{6}-\phi)}\qquad\{A\}\\\dot{I}_b&=\dot{I}'_b-\dot{I}'_a=\dot{I}''_b-\dot{I}''_a=I\in^{j(\frac{-2\pi}{3}-\phi)}-I\in^{j(-\phi)}\\&=\sqrt{3}\ I\in^{j(-\frac{2}{3}\pi-\frac{\pi}{6}-\phi)}\qquad(A)\end{aligned}\right\}(4-86)$$

ويمكن حساب تيار الخط في المعادلة (4-86) باستخدام رسم المتجهات في الشكل ٤-٥٥ واستخدام الدوال المثلثية كما يلي :

$$\dot{I}_a=\dot{I}'_a-\dot{I}'_c=\dot{I}''_a-\dot{I}''_c=I\in^{j(-\phi)}-I\in^{j(\frac{-4\pi}{3}-\phi)}$$

$$= I \{ \cos(-\phi) + j \sin(-\phi) \} - I \{ \cos(\frac{-4\pi}{3} - \phi) + j \sin(\frac{-4\pi}{3} - \phi) \}$$

$$= I \left[\cos \phi - \{ \cos(\frac{-4\pi}{3}) \cos \phi + \sin(\frac{-4\pi}{3}) \sin \phi \} \right]$$

$$+ j I \{ \sin(-\phi) - \sin(\frac{-4\pi}{3}) \cos \phi + \cos(\frac{-4\pi}{3}) \sin \phi \}$$

$$= I \{ \cos \phi - (\frac{-1}{2} \cos \phi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \phi) + j(-\sin \phi - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \phi - \frac{1}{2} \sin \phi) \}$$

$$= I \{ (\frac{3}{2} \cos \phi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \phi) - j(\frac{3}{2} \sin \phi + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \phi) \}$$

$$= \sqrt{3}\ I \{ (\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \phi - \frac{1}{2} \sin \phi) - j(\frac{1}{2} \cos \phi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \phi) \}$$

$$\dot{I}_a = \sqrt{3}\ I \{ (\cos \frac{\pi}{6} \cos \phi - \sin \frac{\pi}{6} \sin \phi) - j(\sin \frac{\pi}{6} \cos\phi + \cos \frac{\pi}{6} \sin \phi) \}$$

$$= \sqrt{3}\ I \{ \cos(\frac{\pi}{6} + \phi) - j \sin(\frac{\pi}{6} + \phi) \} = \sqrt{3} I \{ \cos(\frac{-\pi}{6} - \phi) + j \sin(\frac{-\pi}{6} - \phi) \}$$

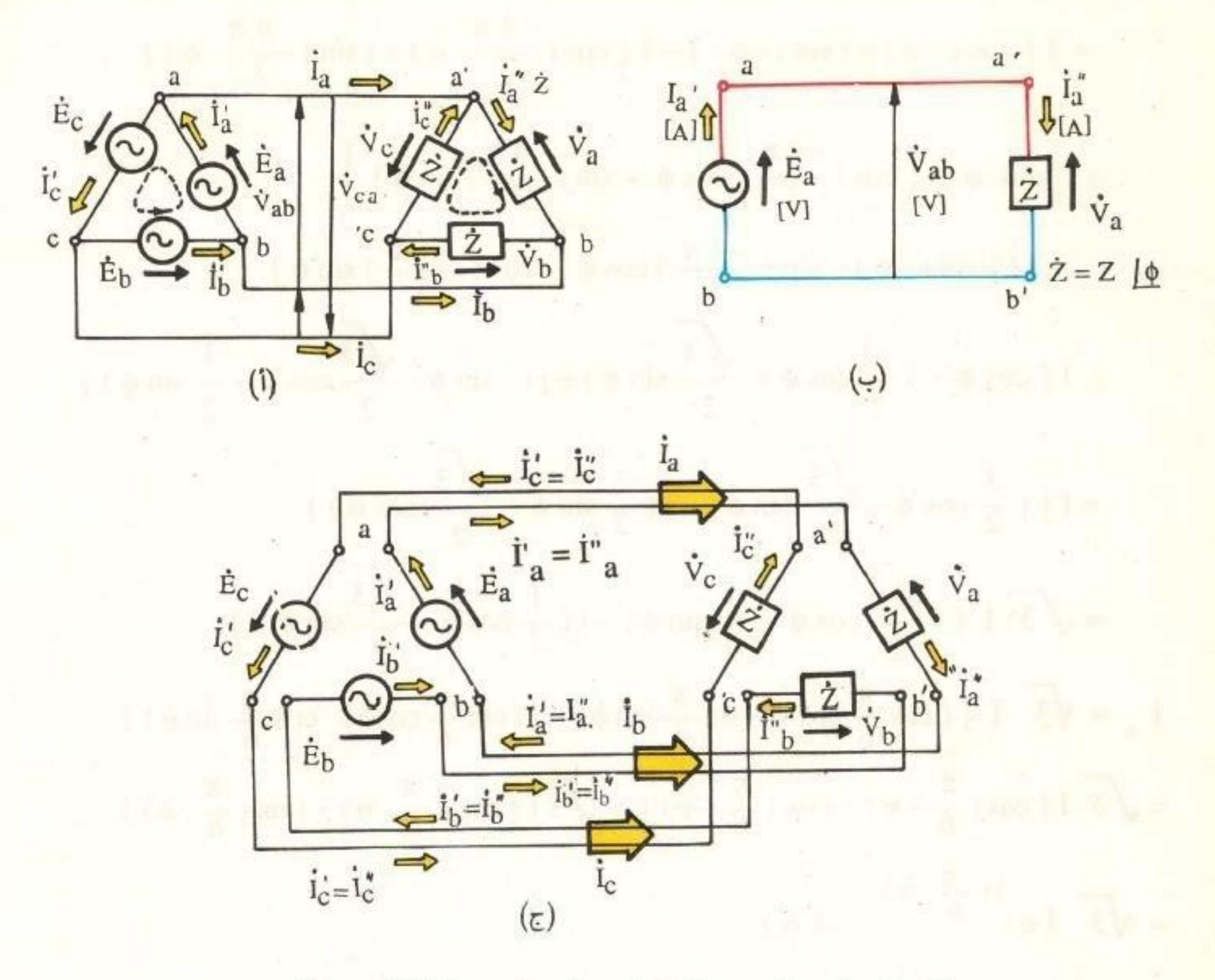
$$= \sqrt{3}\ I \in^{j(\frac{-\pi}{6} - \phi)} \quad (A)$$

وبطريقة مماثلة يمكن حساب كل من $\dot{I}_b$, $\dot{I}_c$:

بقية المعادلة (4-86)

$$\dot{I}_c = \dot{I}'_c - \dot{I}'_b = \dot{I}''_c - \dot{I}''_b = I \in^{j(\frac{-4\pi}{3} - \phi)} - I \in^{j(\frac{-2\pi}{3} - \phi)}$$

$$= \sqrt{3}\ I \in^{j(\frac{-4\pi}{3} - \frac{\pi}{6} - \phi)} \quad (A)$$



الشكل ٤ - ٥٤ دائرة توصيل دلتا - دلتا $(\Delta - \Delta)$

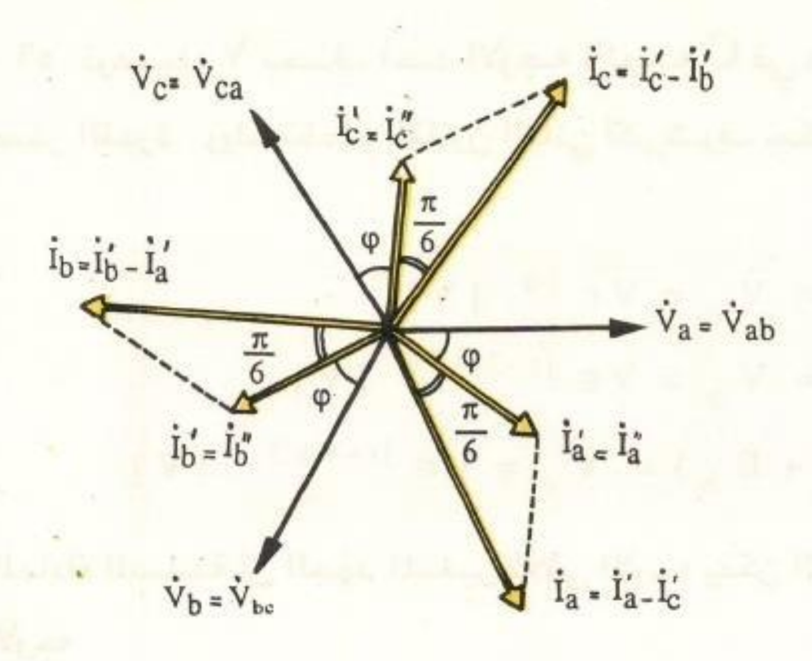
إذا فرضنا أن قيمة تيار في دائرة توصيل دلتا - دلتا هي $I_l(A)$ وقيمة تيار الوجه هى $I_p(A)$ فإن العلاقة بينهما تكون كمايلي :

$$I_l = \sqrt{3}\ I_p \qquad (4-87)$$

حيث يتأخر تيار الخط عن تيار الوجه بزاوية مقدارها $\pi/6(rad)$. وقيمة تيار الخط تكون كمايلي :

$$|\dot{I}_a| = |I_b| = |I_c| = I_l$$

ويبين الشكل ٤ – ٥٥ رسم المتجهات للعلاقة بين الجهد والتيار .



الشكل ٤ – ٥٥ رسم المتجهات في توصيل دلتا – دلتا $(\Delta - \Delta)$

سؤال٢٧

احسب تيار الخط في حمل متوازن ثلاثى الأوجه في دائرة توصيل دلتا – دلتا إذا كانت قيمة تيار الوجه 5 أمبير .

سؤال٢٨

يقوم مصدر قدرة متغير ثلاثي الأوجه ذو جهد خط قيمته $200(V)$ بتغذية ممانعة $\dot{Z} = 40 + j\,30\ (\Omega)$ بتوصيل دلتا . احسب تيارات الوجه وتيارات الخط في هذا الحمل .

د – دائرة توصيل في – دلتا ($V - \Delta$)

يبين الشكل ٤ – ٥٦ توصيل V بحذف أحد الأوجه (الوجه C في هذا الشكل) من توصيل دلتا في مصدر القدرة . وباستخدام القانون الثاني لكيرشوف يمكننا حساب جهد الخط كما يلي :

$$\left.\begin{aligned} \dot{V}_{ab} &= \dot{E}_a = \dot{V}_a = V \in^{j o} \quad [V] \\ \dot{V}_{bc} &= \dot{E}_b = \dot{V}_b = V \in^{j(-2\pi/3)} \quad [V] \\ \dot{V}_{ca} &= -(\dot{E}_a + \dot{E}_b) = \dot{V}_c = V \in^{j(-4\pi/3)} \quad [V] \end{aligned}\right\} \quad (4-88)$$

حيث يتبين من المعادلة السابقة أن الجهد المتغير ثلاثي الأوجه يمكن الحصول عليه من مصدر قدرة ثنائي الأوجه .

وإذا فرضنا أن قيمة جهد الخط هي $V_l [V]$ وقيمة جهد الوجه هي $V_p [V]$ فإن العلاقة بينهما تكون كما يلي :

$$V_l = V_p \quad [V] \qquad (4-89)$$

وتكون قيمة جهد الخط في توصيل $V - \Delta$ تساوي قيمة جهد الوجه .

ويمكن كتابة تيار الخط (على أساس توصيل دلتا للحمل) كما يلي :

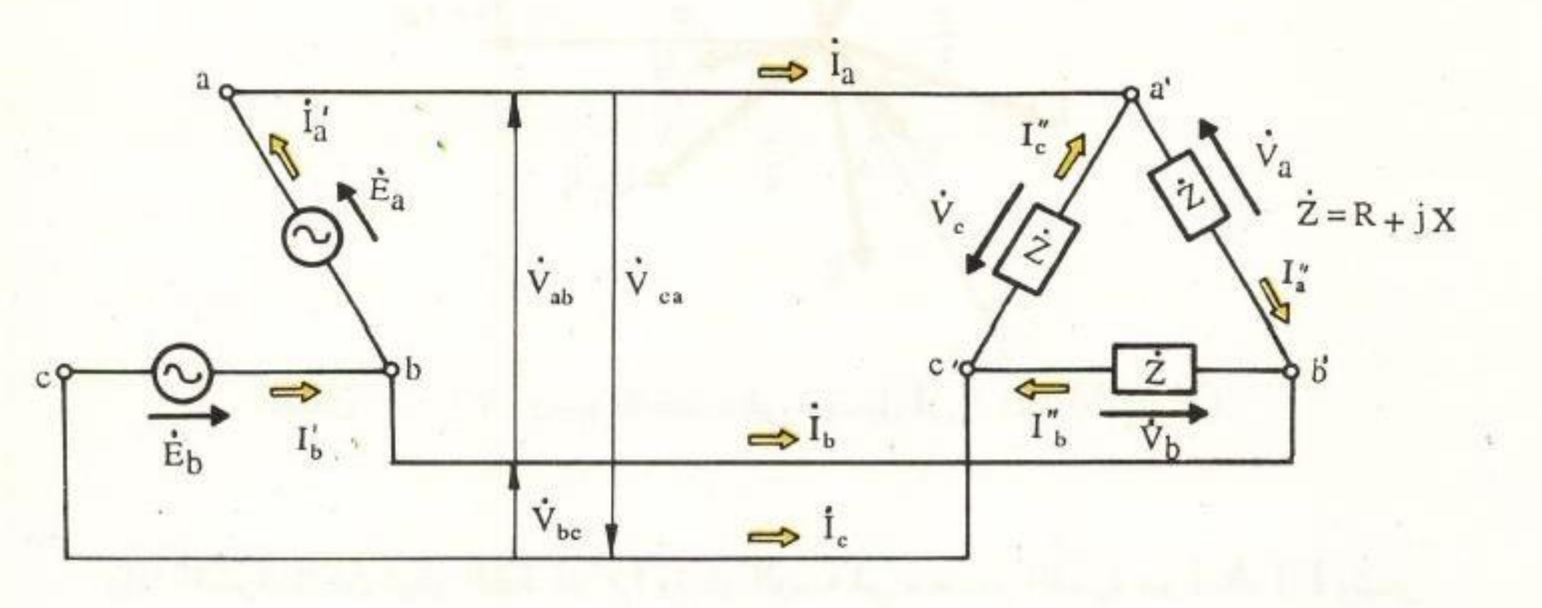
$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}'_a = \dot{I}''_a - \dot{I}''_c = \sqrt{3}\ I'' \in^{j\left(\frac{-\pi}{6} - \phi\right)} \quad [A] \\ \dot{I}_b &= \dot{I}'_b - \dot{I}'_a = \dot{I}''_b - \dot{I}''_a = \sqrt{3}\ I'' \in^{j\left(\frac{-2\pi}{3} - \frac{\pi}{6} - \phi\right)} \quad [A] \\ \dot{I}_c &= -\dot{I}'_b = \dot{I}''_c - \dot{I}''_b = \sqrt{3}\ I'' \in^{j\left(\frac{-4\pi}{3} - \frac{\pi}{6} - \phi\right)} \quad [A] \end{aligned}\right\} \quad (4-90)$$

حيث

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}\ ,\quad I'' = V_p / Z\ ,\quad \tan\phi = X / R$$

وإذا افترضنا أن قيمة تيار الخـط هي $I_\ell\ [A]$ وقيمة تيـار الوجـه في مصدر القدرة هي $I'\ [A]$ وقيمة تيار الوجه في الحمل هى $I_p\ (=I'')[A]$ فإن العلاقة بينها تكون كمايلي :

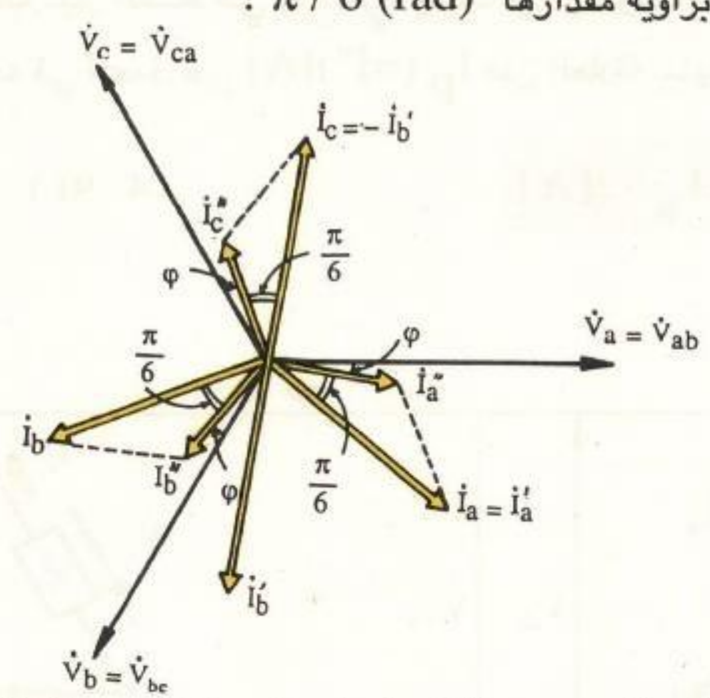
$$I_\ell = I' = \sqrt{3}\ I_p \quad [A] \qquad (4-91)$$



الشكل ٤ – ٥٦ دائرة توصيل ڤى – دلتا ($V - \Delta$)

* لحساب تيار الخط في المعادلة (90 – 4) نستخدم العلاقة (86 – 4)بين تيار الخط وتيار الوجه في دائرة توصيل دلتا – دلتا .

نستنتج مما سبق أن قيمة تيار الخط في توصيل ڤى – دلتا تساوى قيمة تيار الوجه في مصدر القدرة ، وتساوي 3 مضروبة في قيمة تيار الوجه في الحمل . ويتأخر تيار الخط عن تيار الوجه في الحمل بزاوية مقدارها $\pi / 6$ (rad) .



الشكل ٤ – ٥٧ رسم المتجهات في توصيل ڤى – دلتا $(V - \Delta)$

وإذا افترضنا أن تيار الخط هو I_ℓ وتيار الوجه في مصدر القدرة هو I' [A] وتيار الوجه في الحمل هو I_p فإن قيم هذه التيارات تكون كما يلي :

$$|\dot{I}_a| = |\dot{I}_b| = |\dot{I}_c| = I_\ell , \quad |\dot{I}'_a| = |\dot{I}'_b - \dot{I}'_a| = |-\dot{I}'_b| = \dot{I}' , \quad |\dot{I}''_a| = |\dot{I}''_b| = |\dot{I}''_c| = I_p$$

ويبين الشكل ٤ – ٥٧ رسم المتجهات للعلاقة بين الجهد والتيار .

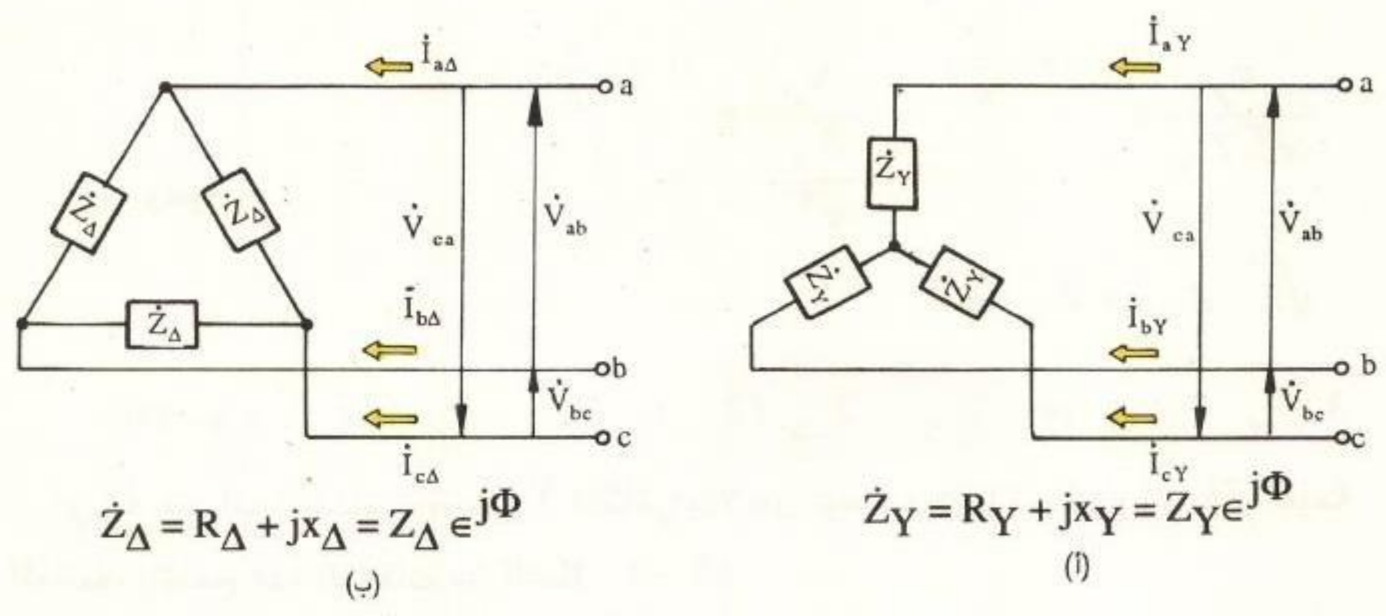
وكثيرًا ما يستخدم توصيل V كمصدر للقدرة ثلاثى الأوجه في المحطات الفرعية الصغيرة عند حدوث عطل في إحدى الوحدات بين المحولات أو في حالات التطوير المستقبلي .

هـ – تحويل توصيل الحمل من Y إلى دلتا وبالعكس .

فى حالة وجود توصيل مختلف لمصدر القدرة عن الحمل، مثلاً توصيل الحمل بطريقة Y

بينما مصدر القدرة بطريقة دلتا يحتاج لحساب حمل دلتا المكافئ لحمل Y لاستخدامه مع مصدر القدرة المتصل بطريقة دلتا .

ويبين الشكلان ٤ – ٥٨ (أ) و ٤ – ٥٨ (ب) الدوائر التى تستخدم مع الجهد المتغير ثلاثي الأوجة نفسه ، وهى حمل متوازن ثلاثي الأوجه في توصيل Y وفى توصيل دلتا . والدائرتان متكافئتان فتمر التيارات نفسها بصرف النظر عن نوع توصيل الحمل .



الشكل ٤ – ٥٨ التحويل $(Y - \Delta)$ Y - delta conversion

فى توصيل الشكل ٤ – ٥٨ (أ) والشكل ٤ – ٥٨ (ب) نفترض أن تيارات الخط هي $I_{\ell Y}$ (A) , $I_{\ell \Delta}$ (A) وأن جـهـد الخط هو V_ℓ (V) فيمكننا أن نستنتج العلاقات الآتية باستخدام المعادلات (4 – 80) , (4 – 86) :

$$|\dot{I}_{aY}| = |\dot{I}_{bY}| = |\dot{I}_{cY}| = I_{\ell Y}, \quad |\dot{I}_{b\Delta}| = |\dot{I}_{a\Delta}| = |\dot{I}_{c\Delta}| = I_{\ell \Delta}$$

$$|\dot{V}_{ab}| = |\dot{V}_{bc}| = |\dot{V}_{ca}| = V_\ell$$

$$\dot{I}_{\ell Y} = \frac{\dot{V}_p}{\dot{Z}_Y} = \frac{\frac{V_\ell}{\sqrt{3}} \in^{j(-\pi/6)}}{Z_Y \in^{j\phi}} = \frac{V_\ell}{\sqrt{3}\, Z_Y} \in^{j(-\phi - \frac{\pi}{6})} \quad (A) \qquad (4-92)$$

$$\dot{I}_{\ell\Delta} = \frac{\dot{V}_{ab}}{\dot{Z}_{\Delta}} - \frac{\dot{V}_{ca}}{\dot{Z}_{\Delta}} = \sqrt{3}\ \frac{V_{\ell}}{Z_{\Delta}} \in^{j(-\phi-\frac{\pi}{6})} = \frac{V_{\ell}}{\frac{Z_{\Delta}}{\sqrt{3}}} \in^{j(-\phi-\frac{\pi}{6})} \quad (A) \qquad (4-93)$$

حيث تصبح الأحمال في الدائرتين متكافئة إذا كان $\dot{I}_{\ell Y}$, $\dot{I}_{\ell\Delta}$ فى المعادلات السابقة متساويان($I_{\ell Y} = I_{\ell\Delta}$) ويكون :

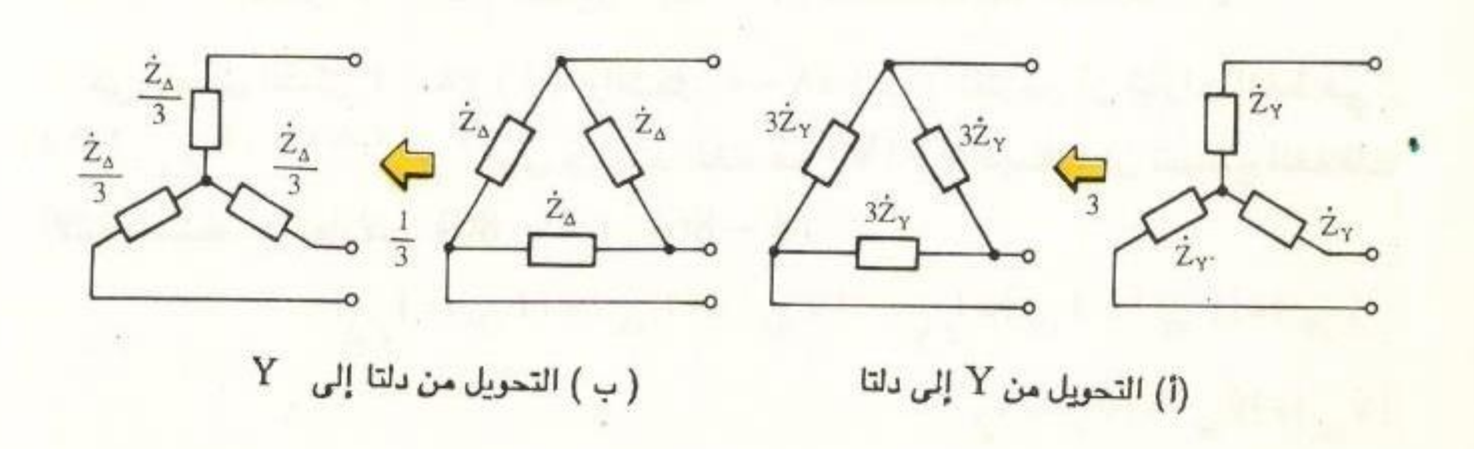
وعليه ،

$$\frac{V_{\ell}}{\sqrt{3}\ Z_{Y}} \in^{j(-\phi-\frac{\pi}{6})} = \frac{V_{\ell}}{\frac{Z_{\Delta}}{\sqrt{3}}} \in^{j(-\phi-\frac{\pi}{6})}$$

$$\sqrt{3}\ \dot{Z}_{Y} = \dot{Z}_{\Delta} / \sqrt{3}$$

$$3\dot{Z}_{Y} = \dot{Z}_{\Delta} \quad \text{or} \quad \dot{Z}_{Y} = \dot{Z}_{\Delta} / 3 \qquad (4-94)$$

أي إنه عند استخدام توصيل Y المكافئ بدلاً من توصيل دلتا نحتاج إلى 1/3 قيمة الممانعة. وتتضح هذه العلاقات من الشكل ٤ – ٥٩ .



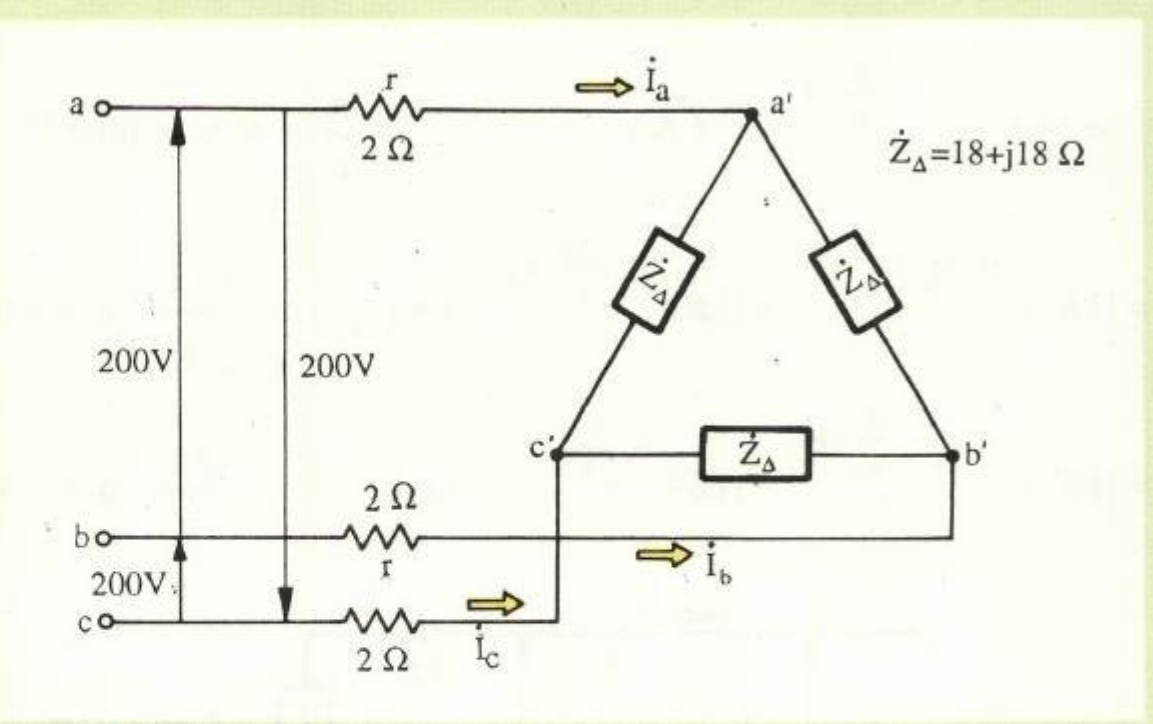
(ب) التحويل من دلتا إلى Y

(أ) التحويل من Y إلى دلتا

الشكل ٤ – ٥٩ تحويل توصيل الحمل من Y إلى دلتا وبالعكس .

مثال٦

فى الدائرة المبينة بالشكل ٤ – ٦٠ يقوم جهد متغير ثلاثى الأوجه متماثل قيمته 200 V بتغذية الحمل المتصل بطريقة دلتا. فإذا كانت ممانعة وجه الأحمال هى $\dot{Z} = 18 + j\,18\,(\Omega)$ ومقاومة كل خط هى $2\,(\Omega)$ ، احسب تيارات الخط .



الشكل ٤ – ٦٠ حمل ثلاثى الأوجه توصيل دلتا .

الحــل

نقوم بتحويل الحمل بتوصيلــة دلتــا إلــى توصيلــة Y كمــا في الشكل ٤–٦١

$$\dot{Z}_Y = \dot{Z}_\Delta / 3 = 6 + j\,6\;(\Omega) \quad , \quad \dot{Z} = r + \dot{Z}_Y = 2 + 6 + j\,6 = 8 + j6\;(\Omega)$$

قيمة الجهد : $V_p = V_\ell / \sqrt{3} = 200 / \sqrt{3} = 116 \quad (V)$

وقيمة تيار الخط : $Z = \sqrt{(8)^2 + (6)^2} = 10\,(\Omega)\,,\; I_\ell = V / Z = 116 / 10 = 11.6\;(A)$

وقيمة الزاوية ϕ :
$$\tan\phi = 6/8 \longrightarrow \phi = 36.9^{o}$$

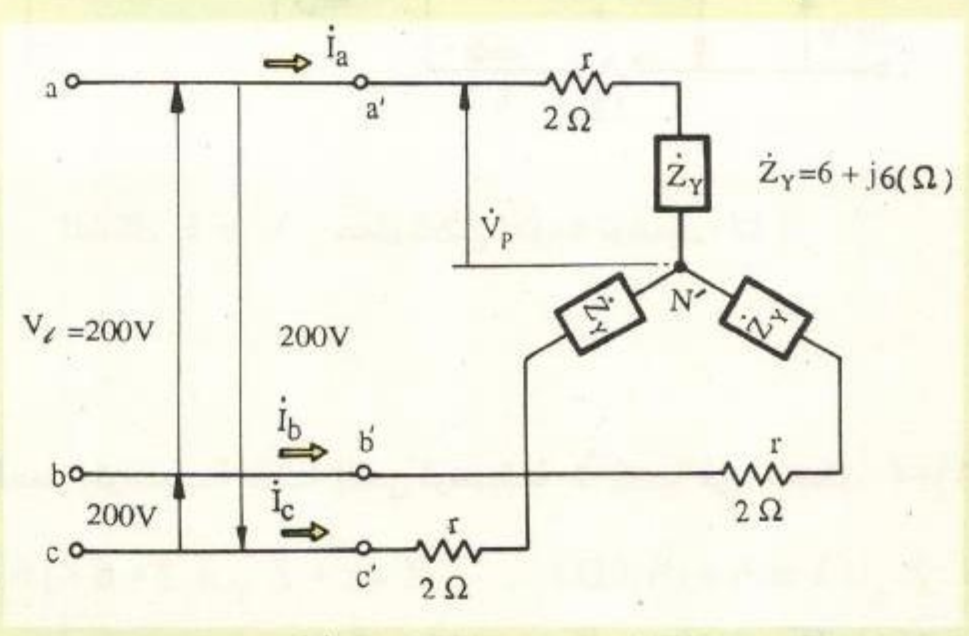
وتكون تيارات الخط كما يلي

$$I_{\ell} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{116 \in^{jo}}{10 \in^{j\phi}} = 11.6 \in^{j(-\phi)} \quad (A)$$

$$\dot{I}_a = 11.6 \in^{j(-\frac{\pi}{6}-\phi)} \quad (A), \qquad -\frac{\pi}{6} - \phi = -66.9^{o}$$

$$\dot{I}_b = 11.6 \in^{j(-\frac{2\pi}{3}-\frac{\pi}{6}-\phi)} = 11.6 \in^{j(-\frac{5\pi}{6}-\phi)} \quad (A), \qquad -\frac{5\pi}{6} - \phi = -186.9^{o}$$

$$\dot{I}_c = 11.6 \in^{j(-\frac{4\pi}{3}-\frac{\pi}{6}-\phi)} = 11.6 \in^{j(\frac{-3\pi}{2}-\phi)} \quad (A), \qquad -\frac{3\pi}{2} - \phi = -306.9^{o}$$



الشكل ٤ – ٦١ حمل Y المكافئ

سؤال٢٩

يقوم مصدر قدرة يستخدم توصيل Y وجهد وجه قيمته $100(V)$ بتغذية حمل توصيل دلتا ممانعته (Ω) $Z = 15\sqrt{3} + j\,15$. احسب التيار في كل خط .

٤ – ٥ – ٣ القدرة ثلاثية الأوجه

أ – التعبير عن القدرة ثلاثية الأوجه

القدرة المستهلكة في دائرة التيار المتغير ثلاثي الأوجه تسمى القدرة ثلاثية الأوجه . وهذه يمكن حسابها باستخدام الطريقة التى استخدمناها لحساب القدرة في دائرة التيار المتغير ذات الوجه الواحد في توصيل Y أو توصيل دلتا . و يمكن استنتاج القيمة اللحظية P للقدرة ثلاثية الأوجه بتجميع حاصل ضرب القيمة اللحظية للجهد في القيمة اللحظية للتيار في كل وجه أي إن P تكون كما يلى :

$$P = \upsilon_a i_a + \upsilon_b i_b + \upsilon_c i_c \quad (W)$$

حيث يمكن إيجاد القدرة في دائرة التيار المتغير ثلاثي الأوجه مع حمل متوازن عن طريق ضرب القيمة المتوسطة لقدرة الوجه الواحد في 3 على افتراض أن القيمة المتوسطة للقدرة متساوية في كل وجه . فإذا كان جهد الوجه هو $V_p(V)$ وتيار الوجه هو $I_p(A)$ ومعامل قدرة الحمل هو $\cos\phi$ فإن القدرة ثلاثية الوجه $P(W)$ تكون كما يلي :

$$P = 3\,V_p\,I_p\,\cos\phi \quad (W) \qquad (4-95)$$

أما القدرة غير الفعالة $Q(var)$ والقدرة الظاهرة $S(VA)$ فمعادلاتها كمايلي :

$$Q = 3\,V_p\,I_p\,\sin\phi \quad (var) \qquad (4-96)$$

$$S = 3\,V_p\,I_p \quad [VA] \qquad (4-97)$$

أمـا بالنـسبة لحمـل توصـيـل Y فـإن العـلاقة بين جـهد الخط $V_\ell(V)$ وتيـار الخـط $I_\ell(A)$ وجهد الوجه $V_p(V)$ وتيار الوجه $I_p(A)$ تصبح كمايلى :

$$V_\ell = \sqrt{3}\ V_p \quad , I_\ell = I_p \qquad (4-98)$$

وبتعويض المعادلة (98 - 4) في المعادلة (95 - 4) نحصل على قيمة القدرة ثلاثية الأوجه $P \{ W \}$ كما يلى :

$$P = 3 . \frac{1}{\sqrt{3}} V_\ell I_\ell \cos\phi = \sqrt{3}\ V_\ell I_\ell \cos\phi \qquad (4-99)$$

وبالنسبة لحمل توصيل دلتا فإن العلاقة بين الجهود والتيارات تكون كما يلى :

$$V_\ell = V_p \ , \quad I_\ell = \sqrt{3}\ I_p \qquad (4-100)$$

وبتعويض المعادلة (100 - 4) في المعادلة (95 - 4) نحصل على القدرة ثلاثية الأوجه :

$$P = 3 V_\ell \frac{1}{\sqrt{3}} I_\ell \cos\phi = \sqrt{3}\ V_\ell I_\ell \cos\phi \qquad (4-101)$$

ب - القدرة ثلاثية الأوجـه Three phase power

من العلاقات (99 - 4) , (101 - 4) يمكن التعبير عن القدرة ثلاثية الأوجه كما يلي بصرف النظر عن توصيل الحمل :

$$P = \sqrt{3}\ x\ V_\ell\ x\ I_\ell\ x \text{ power factor} \qquad (4-102)$$

أما القدرة غير الفعالة ثلاثية الأوجه $Q \{ var \}$ والقدرة الظاهـرة ثلاثيـة الأوجـه $S \{ VA \}$ فمعادلاتها كما يلى :

$$\left.\begin{aligned} Q &= \sqrt{3}\ V_\ell I_\ell \sin\phi \quad (var) \\ S &= \sqrt{3}\ V_\ell I_\ell \quad (VA) \end{aligned}\right\} \qquad (4-103)$$

وتستخدم القدرة ثلاثية الأوجه للسعات الكبيرة ووحدات قياسها هي كيلوات {kW} وميجاوات { M W } .

سؤال ٣٠

يقوم مصدر قدرة ثلاثي الأوجه له جهد خط قيمته 200[V] بتغذية حمل توصيلى دلتا ممانعة كل وجه فيه قيمتها $\dot{Z} = 4 + j3\ [\Omega]$. احسب القدرة ثلاثية الأوجه ، والقدرة غير الفعالة ، والقدرة الظاهرة في الحمل .

سؤال ٣١

في السؤال السابق نفترض الممانعة نفسها في توصيل Y . احسب القدرة ثلاثية الأوجه P والقدرة غير الفعاله Q والقدرة الظاهرة S في الحمل .

٤ – ٦ المجال المغناطيسى الدوار Revolving magnetic field

كما درسنا في الفصل الثانى ، عند مرور تيار في موصل يتولد مجال مغناطيسى حوله في اتجاه يتبع قاعدة البريمة اليمنى لأمبير . وعند مرور تيار في موصل موضوع في مجال مغناطيسى نقوم بتطبيق قاعدة اليد اليسرى لفلمنج . وتكون قيمة واتجاه المجال المغناطيسى المتولد بالتيار المستمر ثابتة . فى هذا البند نقوم بدراسة المجال المغناطيسى الدوار المتولد من التيار المتغير الجيبى .

٤ – ٦ –١ المجال المغناطيسى الدوار المتولد من التيار المتغير ثلاثى الأوجه

في الشكل ٤ – ٦٢ (أ) نفترض أن الملفات C , B , A التي لها عدد اللفات نفسه ولها الشكل نفسه تنطبق مراكزها والزاوية بين كل ملف والذى يليه هي $2\pi/3$ {rad}.
فعند مرور التيار المتغير ثلاثى الأوجه المتماثل في هذه الملفات تتولد المجالات المغناطيسية h_c , h_b , h_a التى تتناسب مع قيمة التيار . والاتجاهات الموجبة لكل من h_c , h_b , h_a هى اتجاهات h_c , h_b , h_a في الشكل ٤ – ٦٢ (أ) . وقيمة هذه المجالات كما يلى :

$$\left.\begin{aligned} h_a &= kI_m \sin\omega t = H_m \sin\omega t \quad (A/m) \\ h_b &= kI_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = H_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (A/m) \\ h_c &= kI_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = H_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (A/m) \end{aligned}\right] \quad (4-104)$$

حيث k هو ثابت التناسب طبقًا لشكل الملف .

يعبر الشكل ٤ – ٦٢ (ب) عن المعادلة (104 - 4) . ويمكن التعبير عن قيمة محصلة المجال المغناطيسى h عند اللحظة (2) مثلاً في الشكل ٤ – ٦٢ (ب) بالمعادلة التالية :

$$h = \left| \dot{h}_a + \dot{h}_b + \dot{h}_c \right| = H_m + \frac{H_m}{2}\cos\frac{\pi}{3} + \frac{H_m}{2}\cos\frac{\pi}{3} = \frac{3}{2}H_m \qquad (4-105)$$

وحالة الشكل ٤ – ٦٢ (أ) هى أساس القياس لاتجاه التيار والمجال المغناطيسى.
ومحصلة المجال المغناطيسى h هى مجموع المتجهات h_c , h_b , h_a.

وبطريقة مماثلة يوضح الشكل ٤ – ٦٢ (ج) قيمة واتجاه المجال المغناطيسي عند الأزمنة (1) ، (2) ، ...... ، (6) فى الشكل ٤ – ٦٢ (ب) . ومن الشكل يتبين أن قيمة محصلة المجال المغناطيسي h في الملفات (المتولد نتيجة للتيار المتغير ثلاثي الأوجه) مقدار ثابت

$3\ H_m\ /2$ أما اتجاه المحصلة h فيدور في الاتجاه نفسه مثل تسلسل الأوجه مع الزمن ويتم دورة واحدة من (1) إلى (7) . أي إن مرور التيار المتغير ثلاثي الأوجه الذى تردده f [Hz] في الملفات يجعل محصلة المجال المغناطيسى تدور (f) من المرات كل ثانية واحدة . وسرعة دوران محصلة المجال المغناطيسى $n_s\{rpm\}$ (عدد اللفات في الدقيقة الواحدة) تسمى السرعة المتزامنة وتحسب من المعادلة :

$$n_s = 60\,f \quad (rpm) \qquad (4-106)$$

ويعدّ دوران المجال المغناطيسى مع الزمن جزءا مهمًا لعمل المحرك .

$3 H_m /2$ أما اتجاه المحصلة h فيدور في الاتجاه نفسه مثل تسلسل الأوجه مع الزمن ويتم دورة واحدة من (1) إلى (7) . أي إن مرور التيار المتغير ثلاثي الأوجه الذى تردده f [Hz] في الملفات يجعل محصلة المجال المغناطيسى تدور (f) من المرات كل ثانية واحدة . وسرعة دوران محصلة المجال المغناطيسى $n_s\{rpm\}$ (عدد اللفات في الدقيقة الواحدة) تسمى السرعة المتزامنة وتحسب من المعادلة :

$$n_s = 60 f \quad (rpm) \qquad (4 - 106)$$

ويعدّ دوران المجال المغناطيسى مع الزمن جزءا مهمًا لعمل المحرك .

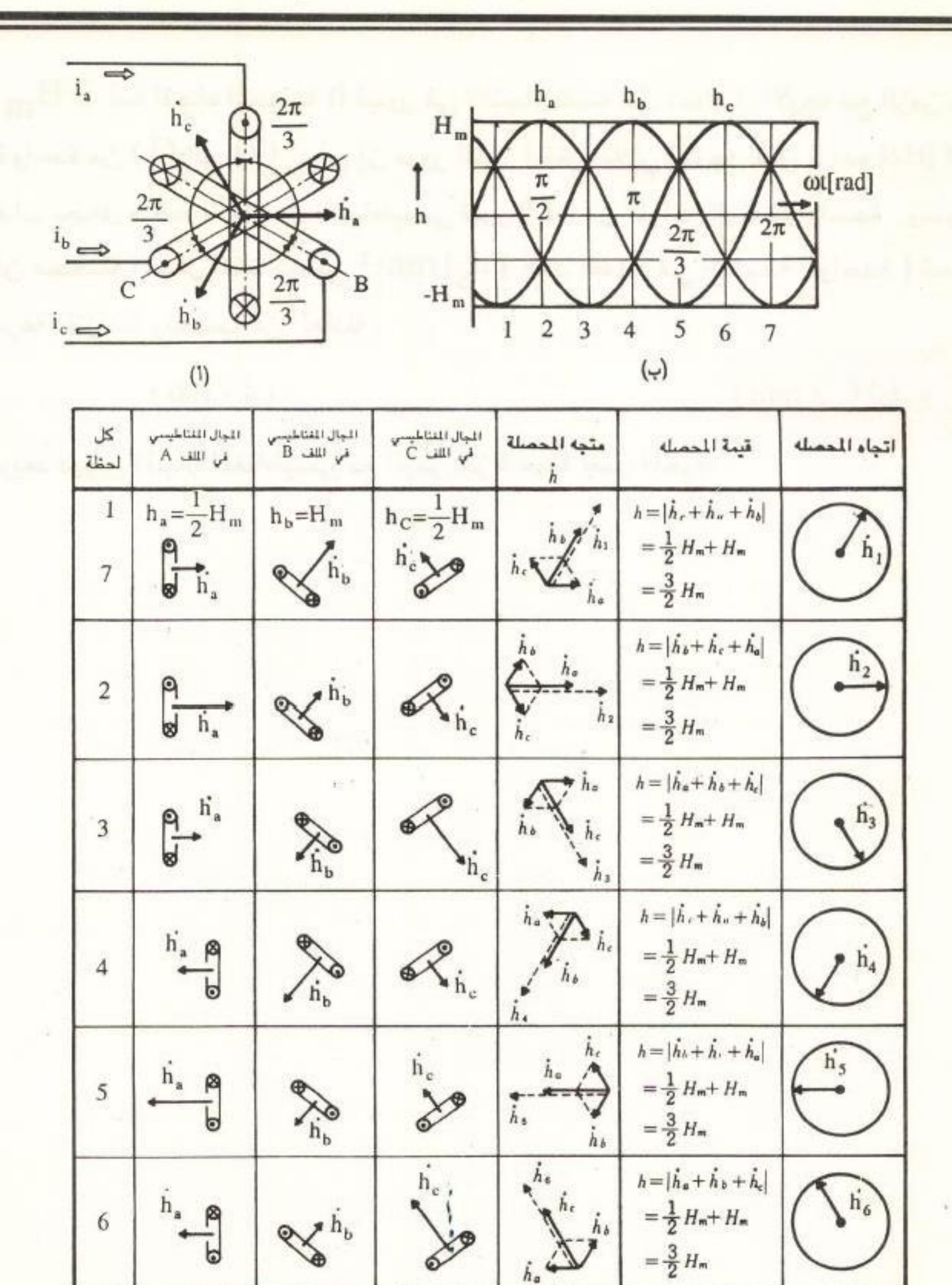
الحمد لله تعالى الذي تتم بنعمه الصالحات

لقد وفقت بتصوير النسخة اسكنر بصورة جديده

وطباعة ممتازة

نسألكم الدعاء بظهر الغيب لي ولوالدي

اخوكم في الله أبو عبد الله عبد المهيمن فوزي



كل لحظة	المجال المغناطيسي في الملف A	المجال المغناطيسي في الملف B	المجال المغناطيسي في الملف C	متجه المحصلة $\dot{h}$	قيمة المحصله	اتجاه المحصله
1 7	$h_a=\frac{1}{2}H_m$ $\dot{h}_a$	$h_b=H_m$ $\dot{h}_b$	$h_C=\frac{1}{2}H_m$ $\dot{h}_c$	$\dot{h}_b$ $\dot{h}_1$ $\dot{h}_c$ $\dot{h}_a$	$h=\lvert\dot{h}_c+\dot{h}_a+\dot{h}_b\rvert$ $=\frac{1}{2}H_m+H_m$ $=\frac{3}{2}H_m$	$\dot{h}_1$
2	$\dot{h}_a$	$\dot{h}_b$	$\dot{h}_c$	$\dot{h}_b$ $\dot{h}_a$ $\dot{h}_2$ $\dot{h}_c$	$h=\lvert\dot{h}_b+\dot{h}_c+\dot{h}_a\rvert$ $=\frac{1}{2}H_m+H_m$ $=\frac{3}{2}H_m$	$\dot{h}_2$
3	$\dot{h}_a$	$\dot{h}_b$	$\dot{h}_c$	$\dot{h}_a$ $\dot{h}_b$ $\dot{h}_c$ $\dot{h}_3$	$h=\lvert\dot{h}_a+\dot{h}_b+\dot{h}_c\rvert$ $=\frac{1}{2}H_m+H_m$ $=\frac{3}{2}H_m$	$\dot{h}_3$
4	$\dot{h}_a$	$\dot{h}_b$	$\dot{h}_c$	$\dot{h}_a$ $\dot{h}_c$ $\dot{h}_b$ $\dot{h}_4$	$h=\lvert\dot{h}_c+\dot{h}_a+\dot{h}_b\rvert$ $=\frac{1}{2}H_m+H_m$ $=\frac{3}{2}H_m$	$\dot{h}_4$
5	$\dot{h}_a$	$\dot{h}_b$	$\dot{h}_c$	$\dot{h}_c$ $\dot{h}_a$ $\dot{h}_5$ $\dot{h}_b$	$h=\lvert\dot{h}_b+\dot{h}_c+\dot{h}_a\rvert$ $=\frac{1}{2}H_m+H_m$ $=\frac{3}{2}H_m$	$\dot{h}_5$
6	$\dot{h}_a$	$\dot{h}_b$	$\dot{h}_c$	$\dot{h}_6$ $\dot{h}_c$ $\dot{h}_b$ $\dot{h}_a$	$h=\lvert\dot{h}_a+\dot{h}_b+\dot{h}_c\rvert$ $=\frac{1}{2}H_m+H_m$ $=\frac{3}{2}H_m$	$\dot{h}_6$

(جـ)

الشكل ٤ – ٦٢ المجـال المغناطيسي الدوار المتولد عند مرور التيار المتغير ثلاثى الأوجه

٤ – ٦ – ٢ محرك الحث Induction motor

لنفترض أننا وضعنا جزءاً دواراً (rotor) قادراً على الدوران الحر في مجال مغناطيسى دوار متولد من تيار متغير ثلاثى الأوجه أو ثنائى الأوجه . فإنه طبقًا لمبدأ قرص أراجو* يسري تيار تأثيري في الموصل على سطح الجزء الدوار يجعل الجزء الدوار يدور نتيجة للقوة الكهرومغناطيسية التي تؤثر على الموصل في المجال المغناطيسي الدوار . ويكون اتجاه دوران الجزء الدوار هو اتجاه المجال المغناطيسى الدوار نفسه. ويسمى هذا النوع من المحركات محرك الحث .

أ – سرعة الدوران والسرعة المتزامنة n_S {rpm} Synchronous speed

إذا افترضنا أن تردد مصدر القدرة هو f { Hz } وعدد الأقطاب المغناطيسية (مجموع أقطاب N وأقطاب S يكون عدداً زوجياً) هو P فإننا نحصل على العلاقة الآتية :

$$n_s = \frac{120\,f}{P} \quad (\text{rpm}) \qquad (4 - 107)$$

ونسبة الفرق بين السرعة المتزامنة (n_S) وبين سرعة دوران الجزء الدوار (n) إلى السرعة المتزامنة (n_S) تسمى الانزلاق (slip) وتحسب من المعادلة التالية :

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 \quad (\%) \qquad (4 - 108)$$

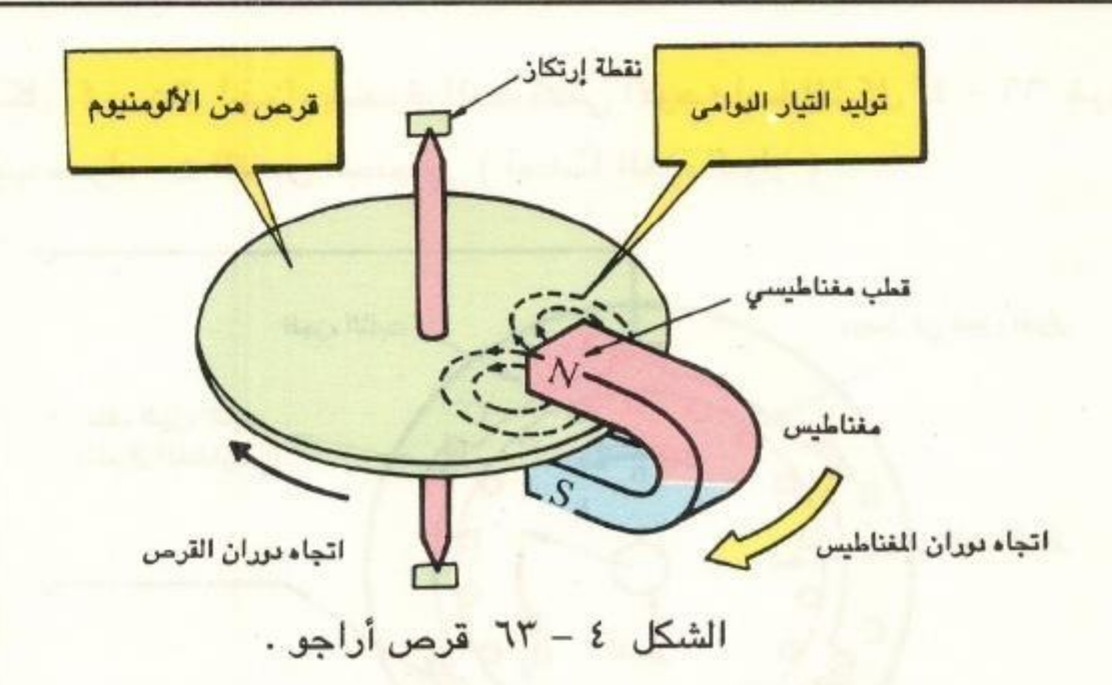
الانزلاق S هو نسبة تأخر الجزء الدوار إلى السرعة المتزامنة ويحسب كنسبة مئوية . وتتراوح قيمة الانزلاق S بين صفر ، 100 في المئة . وفي حالة سكون الجزء الدوار تكون S = 100 % وفى حالة الدوران بدون حمل تكون S = 0 % تقريبا. وعند تشغيل الحمل الكامل فإن S = 4 - 10 % .

سؤال٣٢

يقوم مصدر قدرة تردده 50 هرتز بتغذية محرك حث له أربعة أطراف . احسب سرعة دوران الجزء الدوار في المحرك إذا كان الانزلاق 4% .

*** نبذة عن قرص أراجو Arago's disk**

يبين الشكل ٤ – ٦٣ أن قرص أراجو يتكون من قرص ألومنيوم (مثبت بين نقطتى إرتكاز له قدرة على الحركة بحرية) وقطب مغناطيسى (مثلا مغناطيس على شكل حرف U يحيط بالقرص كالساندوتش دون أن يلامسه ويتحرك أيضا بحرية) . وعند تحرك هذا المغناطيس في اتجاه السهم المبين بالشكل مع حافة القرص يتولد تيار تأثيرى في اتجاه مطابق لقاعدة اليد اليمنى لفلمنج . وتبين الأسهم ذات الخط المتقطع إتجاه التيار التأثيرى . وتتولد قوة كهرومغناطيسية نتيجة للتيار التأثيرى والمجال المغناطيسى على الأقطاب المغناطيسية طبقًا لقاعدة اليد اليسرى لفلمنج فتجعل القرص يدور في إتجاه حركة القطب المغناطيسي . وتكون سرعة دوران القرص أقل قليلاً من سرعة دوران الأقطاب المغناطيسية . واذا عكسنا اتجاه حركة الأقطاب المغناطيسية يدور القرص في الاتجاه العكسي . وظاهرة انجذاب القرص للمغناطيس سببها القوة الكهرومغناطيسية التى تؤثر على التيار التأثيرى في القرص الموصل الموضوع في المجال المغناطيسي .



الشكل ٤ – ٦٣ قرص أراجو .

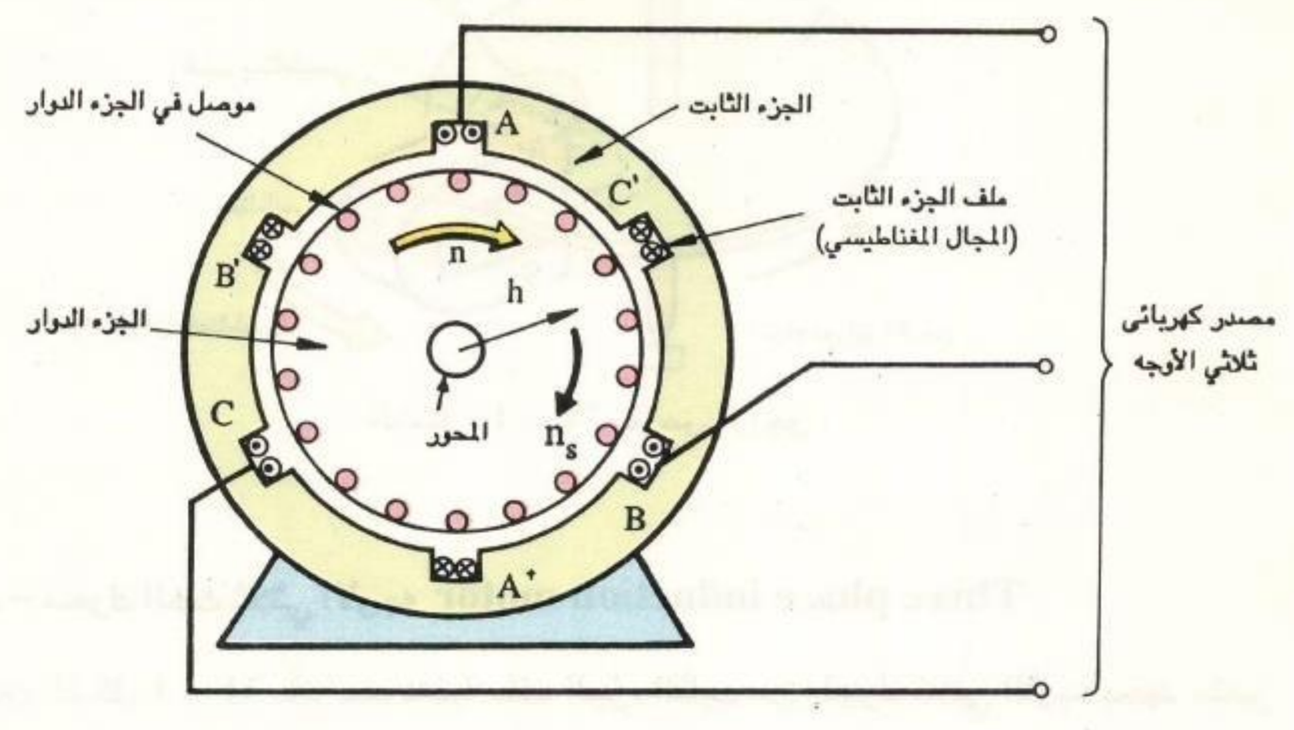
ب – محرك الحث ثلاثي الأوجه Three phase induction motor

يبين الشكل ٤ – ٦٤ أنه عند تغذية ملف الجزء الثابت من المحرك ثلاثي الأوجه بجهد متغير ثلاثى الأوجه يتولد مجال مغناطيسى دوار في ملف الجزء الدوار . ويثبت الجزء الدوار عن طريق نقطتى إرتكاز، وتؤثر عليه قوة كهرومغناطيسية تجعله يستمر في الدوران في إتجاه دوران المجال المغناطيسى الدوار . ومحرك الحث الذى يعمل بهذه الطريقة يسمى محرك الحث ثلاثى الأوجه .

ويمكن تقسيم محركات ا حث ثلاثية الأوجه إلى محرك حث القفص السنجابي، ومحرك حث الجزء الدوار الملفوف طبقًا لتركيب موصل الجزء الدوار ، و في الجزء الدوار الملفوف تتصل أطراف الملف ثلاثي الأوجه بمقاومة البدء الخارجية ودائرة تعويض البدء خلال ثلاثة مجموعات من الفرش وحلقات الانزلاق .

ومحرك الحث ثلاثى الأوجه يتسم بأنه صغير، سهل التركيب، طويل العمر، قليل الاهتزاز، قليل الضوضاء ، سهل التشغيل والصيانة، ويستخدم في الأدوات الميكانيكية كماكينات الخراطه والتثقيب .

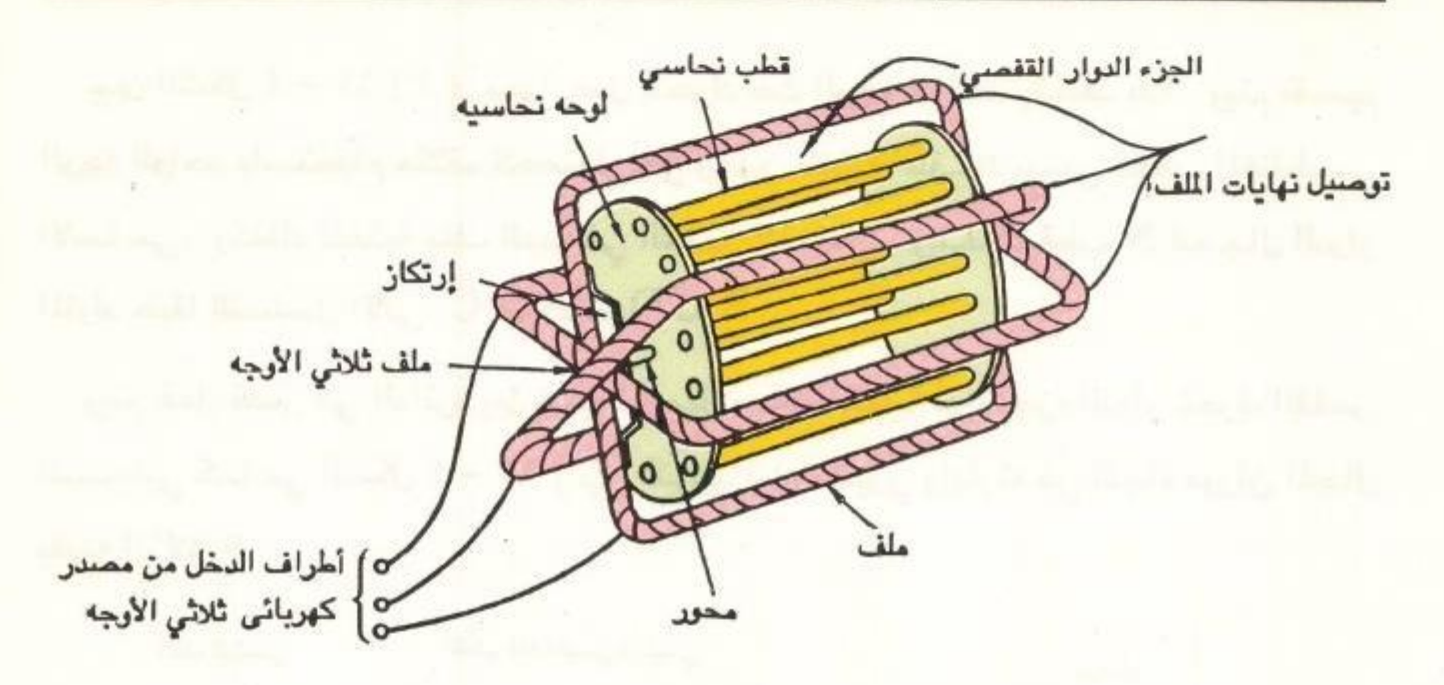
ويبين الشكل ٤ – ٦٥ أجزاء محرك الحث ثلاثى الأوجه أما الشكل ٤ – ٦٦ فيبين نموذجا لتركيب محرك حث القفص السنجابى (أساساً الجزء الدوار) .



الشكل ٤ – ٦٤ محرك الحث ثلاثى الأوجه



الشكل ٤ – ٦٥ تركيب أجزاء محرك الحث ثلاثى الأوجه .



الشكل ٤ – ٦٦ الجزء الدوار لمحرك القفص السنجابي
وملف مجال محرك الحث ثلاثي الأوجه .

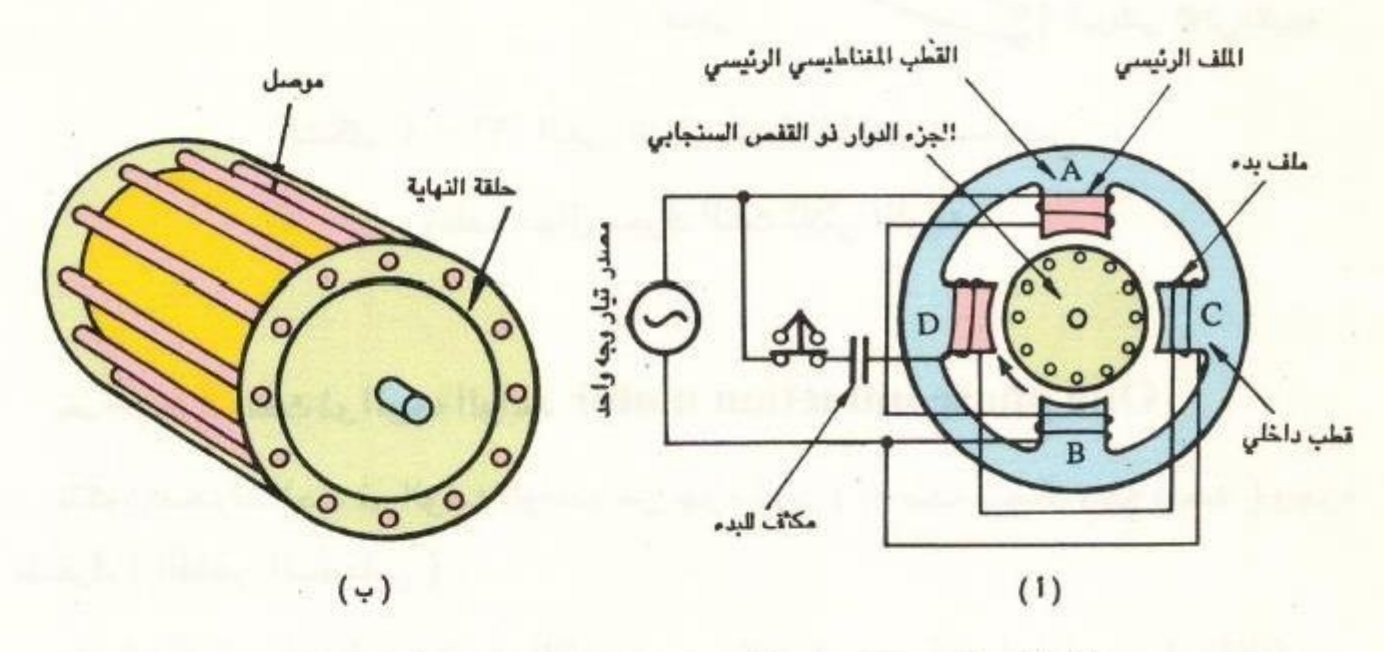
حـ – محرك الحث ذو الوجه الواحد One phase induction motor

يتكون محرك الحث ذو الوجه الواحد من جزء ثابت (به ملف مجال وجه واحد) وجزء متحرك (القفص السنجابى) .

عند تغذية ملف المجال في الجزء الثابت بجهد متغير له وجه واحد لايتولد مجال مغناطيسي دوار ، ولايتولد عزم، ولاتحدث حركة للجزء الدوار . أما عند إدارة الجزء الدوار بأية طريقة ينشأ عزم على الجزء الدوار ويساعد المجال المتغير* المتولد من التيار ذي الوجه الواحد على استمرار دوران الجزء الدوار . ويمكن تقسيم محرك الحث ذى الوجه الواحد طبقًا لطريقة توليد العزم إلى ثلاثة أنواع الأول هو نوع البدء باستخدام الوجه المنفصل و الثاني نوع البدء باستخدام المكثف والنوع الثالث هو ملف الظل . ومحرك الوجه الواحد يتسم بأنه محرك صغير يحتاج إلى أقل من 750 وات، ويستخدم في الصناعة والزراعة والأجهزة الإلكترونية المنزلية .

يبين الشكل ٤ – ٦٧ (أ) مبدأ عمل محرك حث الوجه الواحد بمكثف بدء . ويتم تقسيم الوجه الواحد باستخدام مكثف للحصول على وجهين لتغذية الملف الرئيسى للقطب المغناطيسي الأساسى، وكذلك لتغذية ملف البدء في القطب الإضافى . ويتحرك قطب N للمجال الدوار المتولد طبقا للتسلسل الآتى C ثم A ثم D ثم B .

ويتم عمل قصر في الدائرة بين نهاية الموصل وحلقة النهاية في الجزء الدوار لمحرك القفص السنجابي كما في الشكل ٤ – ٦٧ (ب) لتوليد تيار تأثيري وإدارته في اتجاه دوران المجال بقيمة انزلاق S .



الشكل ٤ – ٦٧ محرك حث وجه واحد ذو مكثف بدء .

* المجال المتغير له شكل موجي جيبي وتتغير شدته .

إذا كانت سرعة الدوران ثابتة فإن مفتاح القوة الطاردة المركزية يكون في وضع التوصيل أو عدم التوصيل لفصل ملف البدء وترك المجال المتغير للملف الرئيسى . ويدور الجزء الدوار بالقصور الذاتي ، ويستمر حدوث التيار التأثيري مما ينتج عنه استمرار الدوران وهذا النوع من المحركات له تيار بدء صغير وعزم بدء كبير .

تمـــــارين

١ – تيار متغير جيبى تردده 50 هرتز وقيمته اللحظية هي :

$$i = 10\sqrt{2}\ \sin\ (\omega t + \frac{\pi}{4}) \qquad [A]$$

احسب المتغيرات التالية :

(١) زمن الدورة $T[s]$ ، (٢) القيمة اللحظية $i\ [A]$ عنـد $t = 5\ [ms]$

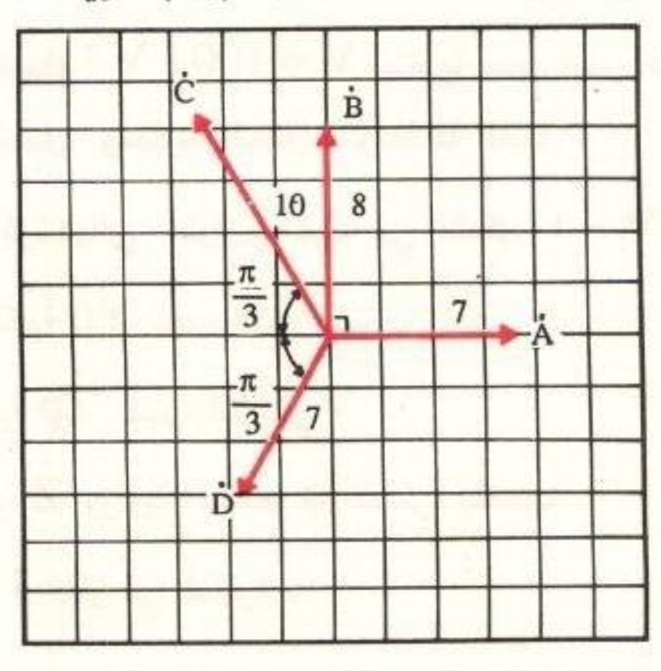
(٣) التردد الدائري $\omega\ [rad/s]$

(٤) زاوية الوجه الابتدائية $\phi\ [rad]$

(٥) القيمة الفعالة $I\ [A]$

(٦) القيمة المتوسطة $Ia\ [A]$

٢ – المطلوب تمثـيل الأعـداد المركـبـة $\dot{A}\ ,\ \dot{B}\ ,\ \dot{C}\ ,\ \dot{D}$ المبـينة في الشكل ٤ – ٦٨ باستخدام الإحداثـيات المتعامدة والإحداثيات القطبـية . أوجد بالرسـم المجموع $\dot{F} = \dot{A} + \dot{D}$ والفرق $\dot{G} = \dot{A} - \dot{D}$ واكتبها بالطريقة نفسها .



الشكل ٤ – ٦٨ رسم المتجهات

٣ – احسب الأعداد المركبة الآتية :

(1) $(6+j9)+(3-j6)$ (2) $(-4+j8)-(-4-j6)$ (3) $(3+j5)\times(6+j2)$

(4) $(8+j6)\times(8-j6)$ (5) $(2+j2\sqrt{3})^2$ (6) $\frac{1}{3+j4}$

(7) $\frac{6+j4}{-j2}$ (8) $50\in^{j\frac{\pi}{3}}\times 20\in^{j\frac{\pi}{6}}$ (9) $6\in^{j\frac{\pi}{2}}\times 5\in^{j(\frac{-\pi}{6})}$

(10) $\frac{25\in^{j0}}{5\in^{j\pi/6}}$

٤ – يقوم جهد متغير جيبى تردده 50 هرتز وقيمته $\dot{V}=100\in^{jo}$ [V] بتغذية دائرة توالى مكونة من مقاومة $R=8\ \{\Omega\}$ وملف $L=19.1\ \{mH\}$ إحسب مايلى :

(١) المفاعلة X_L (٢) المانعات $Z, \dot{Z}$

(٣) التيارات $I, \dot{I}$ (٤) زاوية المانعة ϕ

٥ – يقوم جهد متغير قيمته $\dot{V}=100$ [V] بتغذية حمل فيمر التيار $\dot{I}=3-j4$ [A]
احسب ممانعة الحمل، ومقاومة الحمل ، ومفاعلة الحمل .

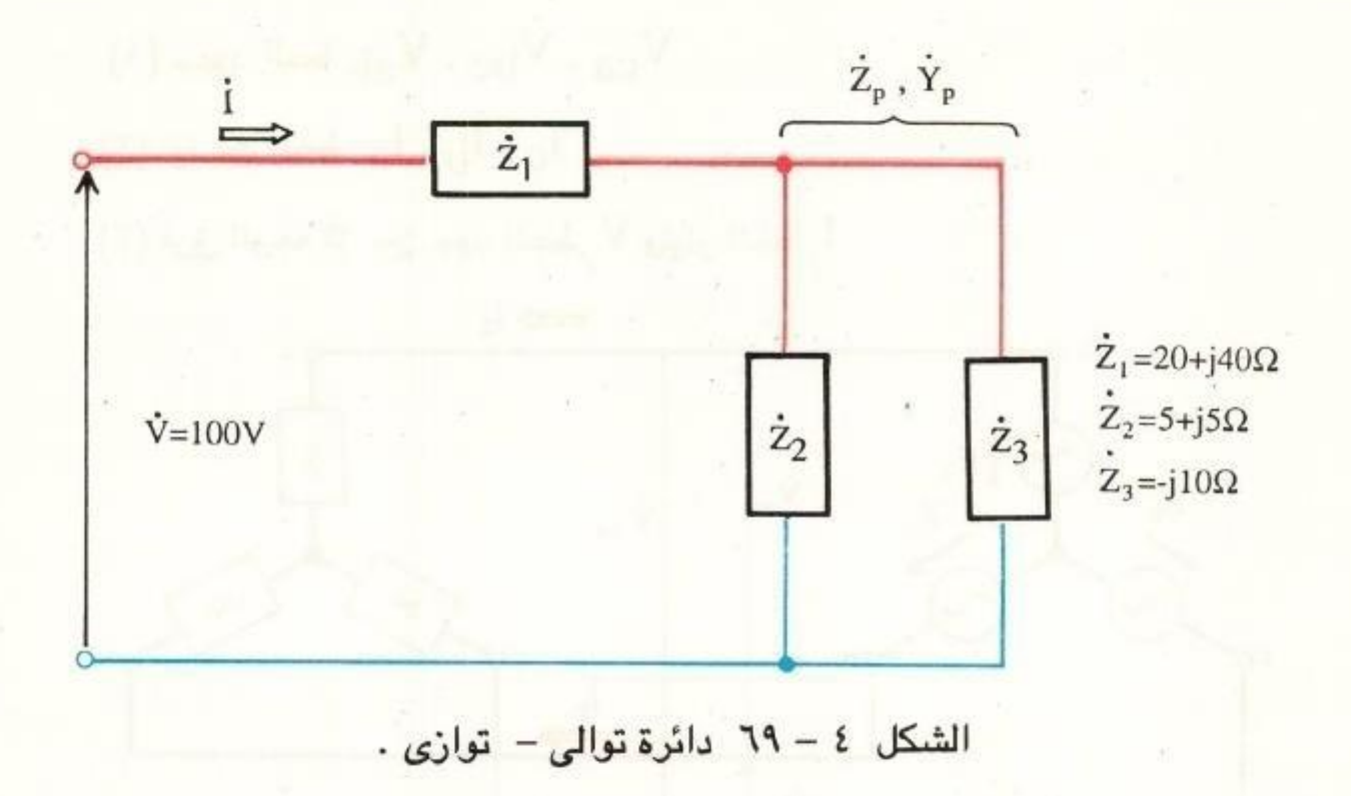
٦ – احسب مايلي لدائرة توالي – توازي المبينة في الشكل ٤ – ٦٩

(١) السماحية الكلية $\dot{Y}p$ لجزء التوازي .

(٢) المانعة الكلية $\dot{Z}p$ لجزء التوازي

(٣) المانعة الكلية $\dot{Z}$ وزاوية المانعة ϕ للدائرة بأكملها .

(٤) التيار الكلى $\dot{I}$ المار في الدائرة .



الشكل ٤ – ٦٩ دائرة توالى – توازى .

٧ – فى الدائرة الخاصة بالسؤال ٤ . احسب معامل القدرة $\cos \phi$ والقدرة الفعالة P والقدرة غير الفعالة Q والقدرة الظاهرة S .

٨ – يقوم جهد متغير ثلاثى الأوجه متماثل نو قوة دافعة كهربائية 115 ڤولت للوجه الواحد بتغذية حمل ثلاثي الأوجه متوازن قيمة حمل كل وجه 50 أوم بطريقة توصيل Y - Y .

إحسب تيار الخط I_ℓ وجهد الخط V_ℓ.

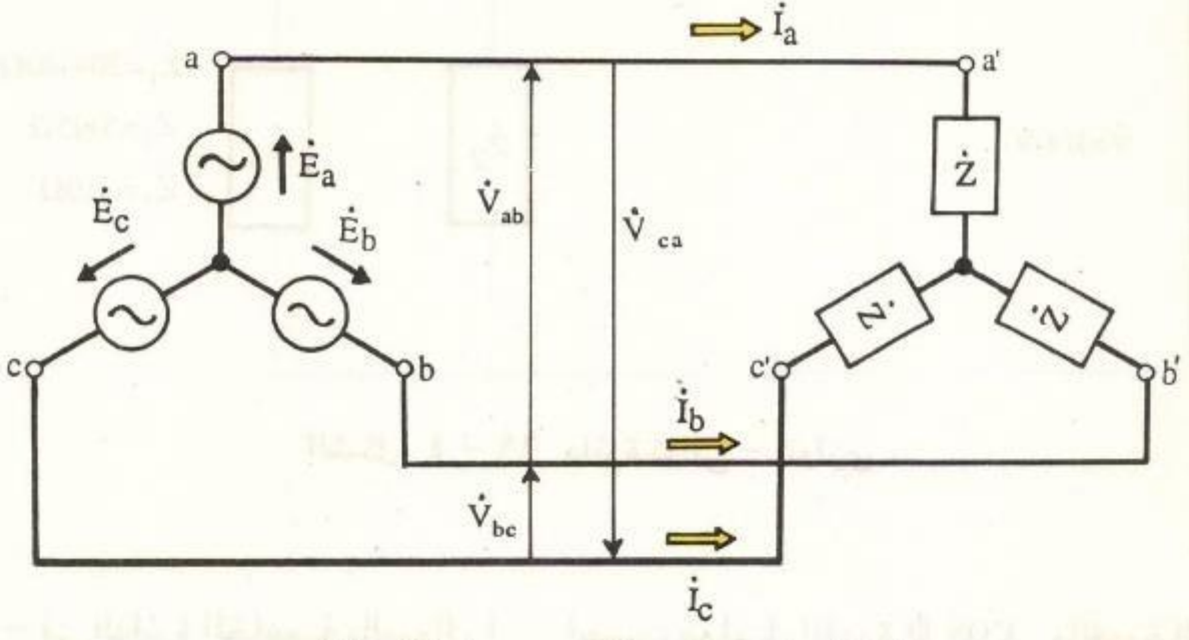
٩ – دائرة توصيل دلتا– دلتا القوة الدافعة الكهربائية لكل وجه في مصدر القدرة 210 ڤولت تستخدم حمل متوازن قيمة الحمل في كل وجه 30 أوم. احسب تيار الوجه وتيار الخط الذى يسرى إلى الحمل .

١٠ – يبين الشكل ٤ – ٧٠ دائرة توصيل Y - Y بها مصدر قدرة ثلاثى الأوجه متماثل وحمل متوازن، قيمة الحمل في كل وجه $\dot{Z} = 8 + j6\ \{\Omega\}$ وقيمة القوة الدافعة الكهربائية في كل وجه 200 ڤولت . احسب مايلي :

(١) جهود الخط $\dot{V}_{ab}$, $\dot{V}_{bc}$, $\dot{V}_{ca}$

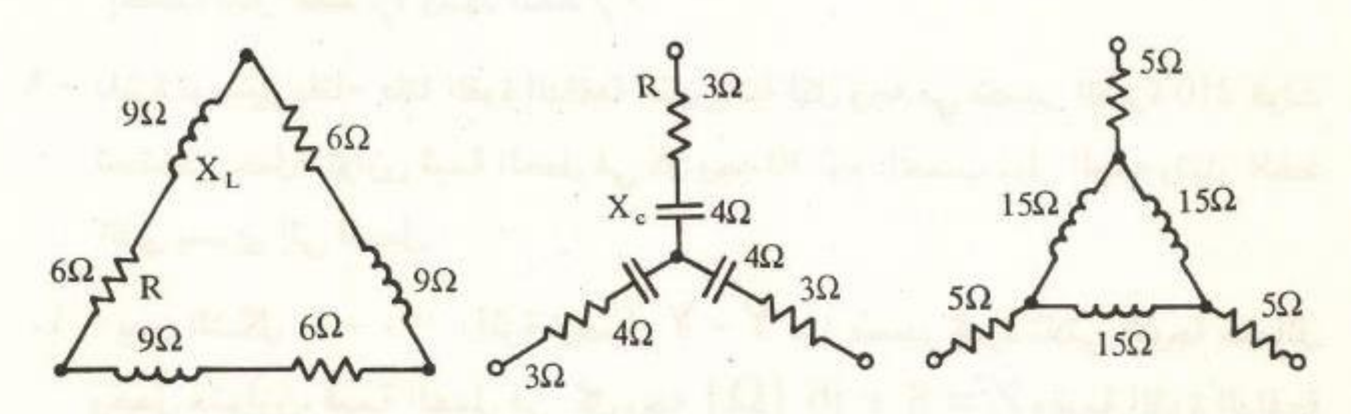
(٢) تيارات الخط $\dot{I}_{a}$, $\dot{I}_{b}$, $\dot{I}_{c}$

(٣) فرق الوجه ϕ بين جهد الخط V_{ℓ} وتيار الخط I_{ℓ} .



الشكل ٤ – ٧٠ دائرة توصيل Y - Y .

١١ – المطلوب تغيير توصيل الحمل في الشكل ٤ – ٧١ إلى توصيلة Y وإلى توصيلة دلتا .



الشكل ٤ – ٧١ تغيير توصيلة الحمل إلى Y أو إلى دلتا .

١٢ - يبين الشكل ٤ - ٧٢ مصدر قدرة ثلاثي الأوجه متماثل له توصيلة دلتا يغذى حمل ثلاثى الأوجه متوازن له توصيلة Y . جهد الوجه في مصدر القدرة قيمته 100 ڤولت, وتيار الخط قيمته [A] $5\in^{j(-\pi/3)}$. أجب عن الأسئلة الآتية :

(١) احسب الجهد الموجود على أوجه الحمل $\dot{V}_a$, $\dot{V}_b$, $\dot{V}_c$ باستخدام الدالة الأسية بالقياس إلى $\dot{E}a$.

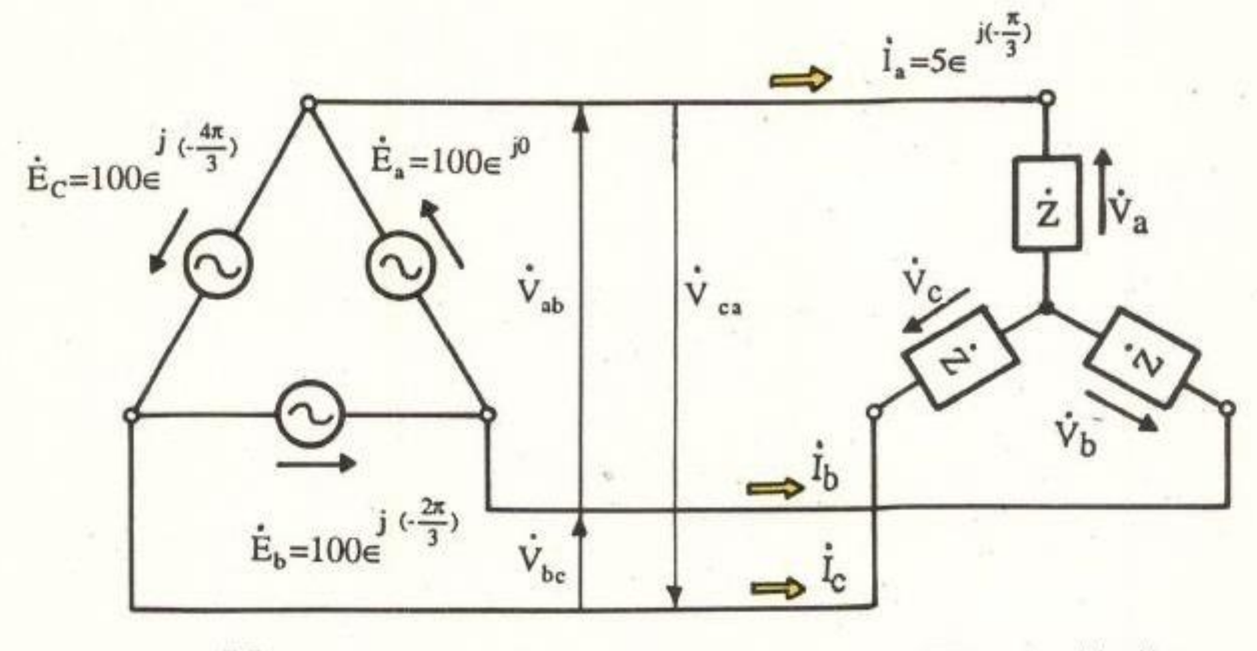
(٢) احسب ممانعة الحمل $\dot{Z}$ باستخدام الاحداثيات المتعامدة والدالة الأسية

(٣) احسب فرق الوجه بين جهد الخط وتيار الخط .

١٣ - احسب المتغيرات الآتية في الدائرة الخاصة بالسؤال السابق :

(١) معامل قدرة الحمل . (٢) القدرة الفعالة P .

(٣) القدرة غير الفعالة Q . (٤) القدرة الظاهرة S .



الشكل ٤ - ٧٢ مصدر قدرة توصيل - دلتا وحمل توصيل - Y .

١٤ - كيف يمكن إدارة كل من محرك الحث ثلاثى الأوجه، ومحرك الحث وجه واحد في الاتجاه العكسي ؟(اقتراح : فكر في طريقة عكس اتجاه دوران المجال الدوار) .



الفصل الخامس
الأشكال الموجية المختلفة
Various waveforms

إن التيار المتغير أو المتردد (AC) الذى سبقت دراسته في الفصل الرابع هو تغيير جيبى للتيار المتردد مع الزمن . وعلى العكس من ذاك فإن الموجة غير الجيبية للتيار المتردد هي أي نوع آخر من الموجات المختلفة عن الموجة الجيبية .

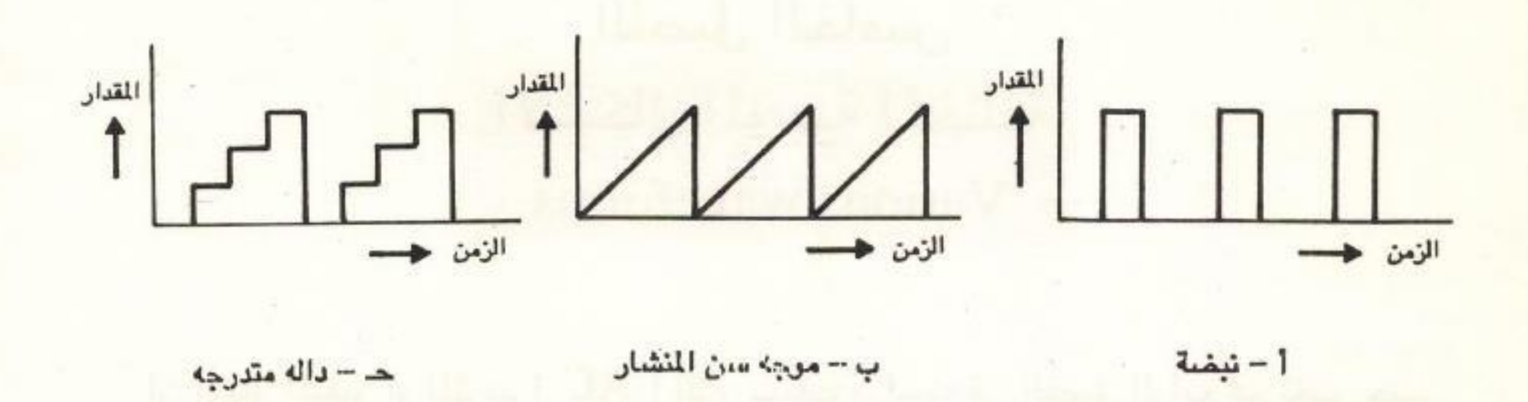
من أمثلة الموجة غير الجيبية للتيار المتردد موجه التيار الموجودة في ملف ذى قلب حديدى يظهر الشكل المركب والمدة الزمنية الثابتة والنبضات ويستخدم هذا النوع من الموجات في الهندسة الإلكترونية مثل أجهزة الحاسب والتلفزيون .

ويعطي فصل ووصل مصدر القدرة في دائرة ما ، موجات عابرة من الجهد والتيار عند لمخرج . وتستخدم أنواع أشكال الموجة هذه أيضاً في الهندسة الكهربائية والإلكترونية .

وسوف نتناول في هذا الفصل الموجة غير الجيبية للتيار المتردد ، وظاهرة النبضات، والظاهرة العابرة .

٥ – ١ موجة التيار المتردد غير الجيبية Non-Sinusoidal

إن موجة التيار المتردد غير الجيبية أو موجة التيار المتردد غير المنتظمة هي موجه تيار متردد من نوع مختلف عن الموجات الجيبية .



شكل ٥ – ١ أمثلة للموجات غير الجيبية للتيار المتردد

٥ – ١ – ١ مركبات موجة التيار المتغير (AC) غير الجيبية

إن تجميع موجات جيبية مختلفة التردد والمدي ينتج موجة غير جيبية كما هو موضح بالمثال في الشكل ٥ – ٢ .

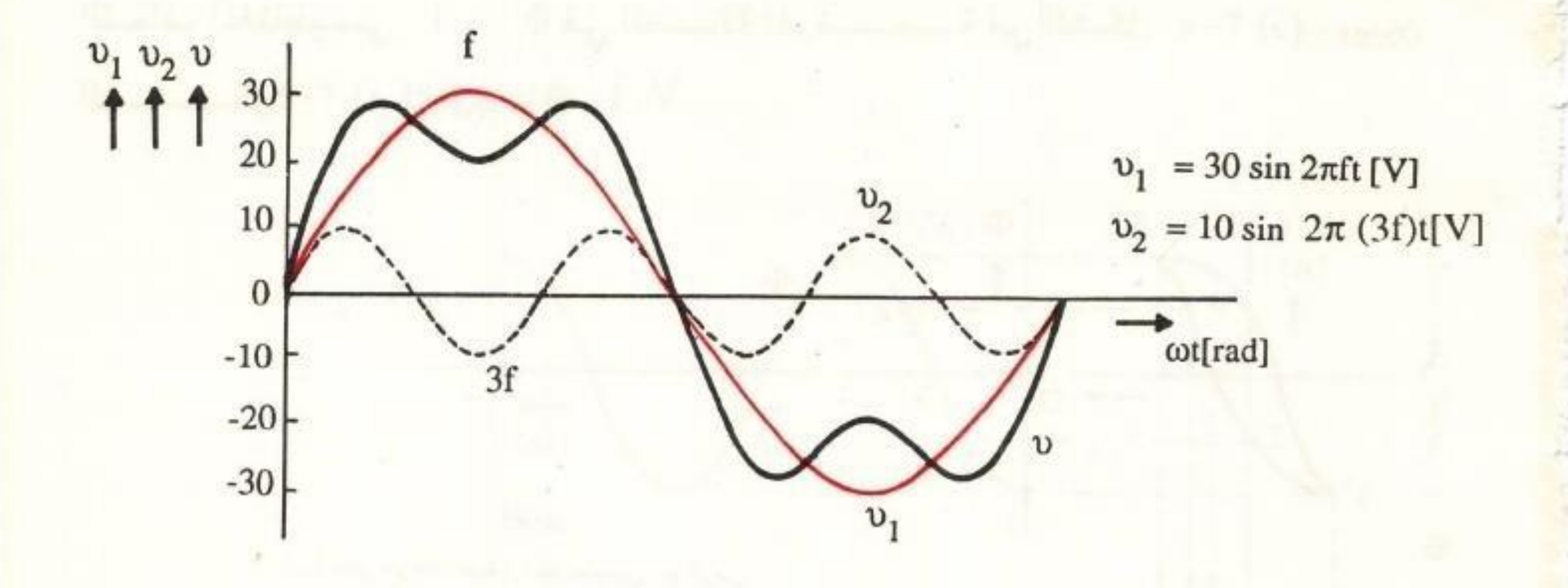
وهكذا فإن تجميع موجة جهد جيبية ممثلة بالمعادلة :

$$v_1 (= 30 \sin 2\pi ft) \quad [V] \qquad (١)$$

والتي ترددها (Hz) f مع موجة جيبية أخرى ممثلة بالمعادلة :

$$v_2 (= 10 \sin 2\pi (3f) t) \quad [V] \qquad (٢)$$

والتي ترددها [Hz] 3 f ينتج موجة جهد [V] V غير جيبية . وفي هذه الحالة فإن v_1 ، v_2 يمثلان عناصر موجة الجهد V .



الشكل ٥ – ٢ مركبات موجه غير جيبية

٥ – ١ – ٢ توليد موجه التيار المتغير (AC) غير الجيبية

إن موجة التيار غير الجيبية تحدث في حالات عديدة ، وهنا سوف نتناول تحليل الجهد والتيار في ملف له قلب حديدي .

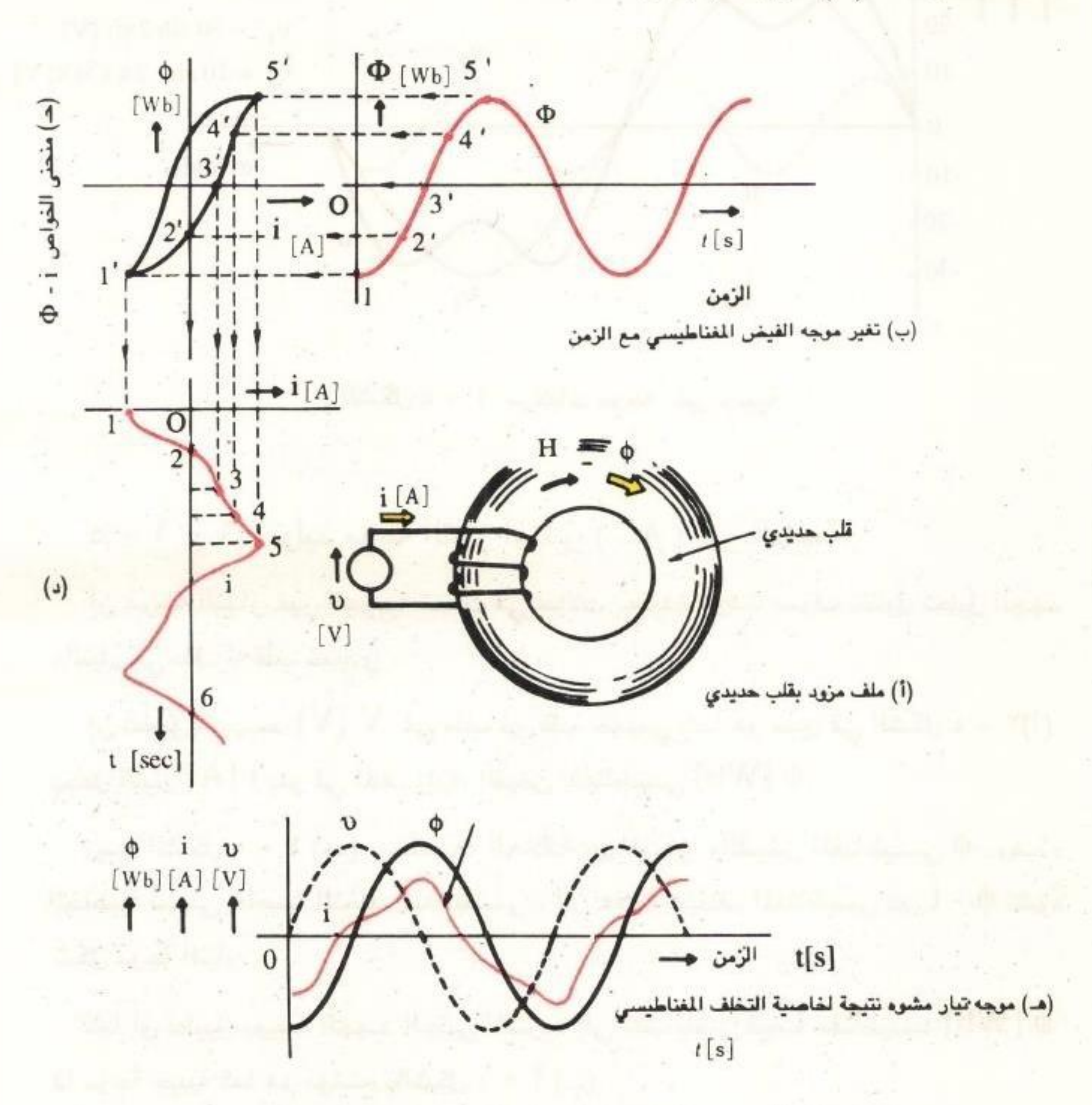
إن تطبيق الجهد V [V] فى ملف ذي قلب حديدي كما هو مبين في الشكل ٥ – ٣(أ) يجعل التيار i [A] يمر في الملف ويولد الفيض المغناطيسى ϕ [Wb].

ويبين الشكل ٥ – ٣ (حـ) خاصية العلاقة بين التيار والفيض المغناطيسى ϕ . وهذه الخاصية تسمى خاصية التخلف المغناطيسى ، لأن علاقة التخلف المغناطيسي بين i - ϕ تشوه شكل موجة التيار .

كما أن تطبيق موجة الجهد الجيبى المتردد إلى ملف ينشئ فيضًا مغناطيسيًا ϕ [Wb] ذا موجة جيبية كما هو موضح بالشكل ٥ – ٣ (ب) .

وتصبح موجة التيار i [A] الناتجة من تسليط الجهد V على الملف واستخدام علاقة

التـخلف المغناطيـسى $i - \phi$ في الحـــالة الموضـــحـــة في الشكل ٥-٣ (د) . ويبين الشـــــكل٥-٣ (هـ) الموجات V, i, ϕ .



الشكل ٥ – ٣ الجهد والتيار لملف له قلب حديدي

سؤال ١

يعطي الملف ذو المحور الهوائى علاقة خطية بين H, ϕ ولاتوجد خاصية التخلف المغناطيسي . فهل يحدث تشوه أو انحراف في موجة التيار ؟

سؤال ٢

فى الشكل ٥ – ٣ (هـ) حدد النقاط V, i, ϕ المقابلة للزمن المحدد عند النقطة 6 في الشكل ٥–٣ (د) .

٥ – ١ – ٣ توافقيات التيار المتغير ذى الموجة غير الجيبية

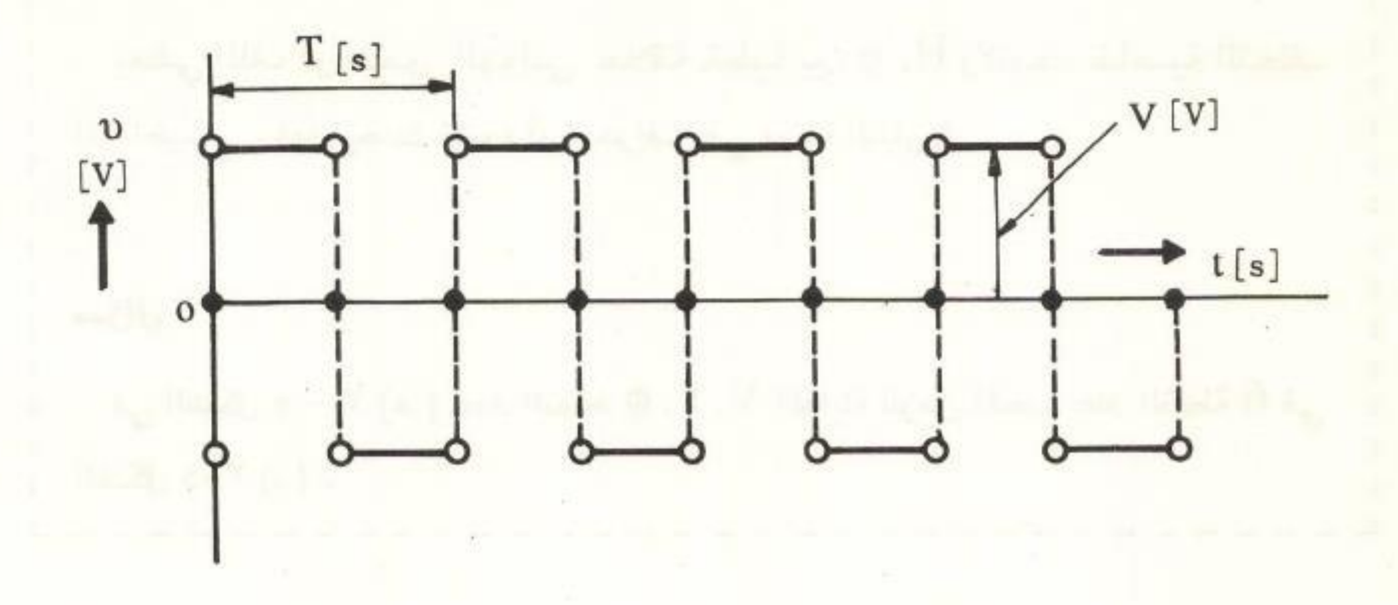
إن شكل الموجة الموضح بالشكل ٥ – ٤ يسمى الموجة المربعة . وتتكرر الموجة المربعة على مدد زمنية ثابتة T وتتمثل نظرياً بالمعادلة الآتية :

$$\upsilon = \frac{4}{\pi} V \left(\sin \omega t + 1/3 \ \sin 3 \omega t + \frac{1}{5} \sin 5 \omega t + 1/7 \sin 7 \omega t + \ldots \right) \qquad (5-1)$$

ففى هذه المعادلة يمثل الحد $\frac{4}{\pi} V \ \sin \omega t$ الموجة التوافقية الأساسية كما يمثل الحد $\frac{4}{3\pi} V \sin 3 \omega t$ ثلاثة أمثال تردد الموجة التوافقية الأساسية ويعدّ التوافق الثالث .

أما الحد $\frac{4}{5\pi} V \sin 5 \omega t$ فيمثل خمسة أمثال تردد الموجة التوافقية الأساسية، ويعدّ التوافق الخامس .

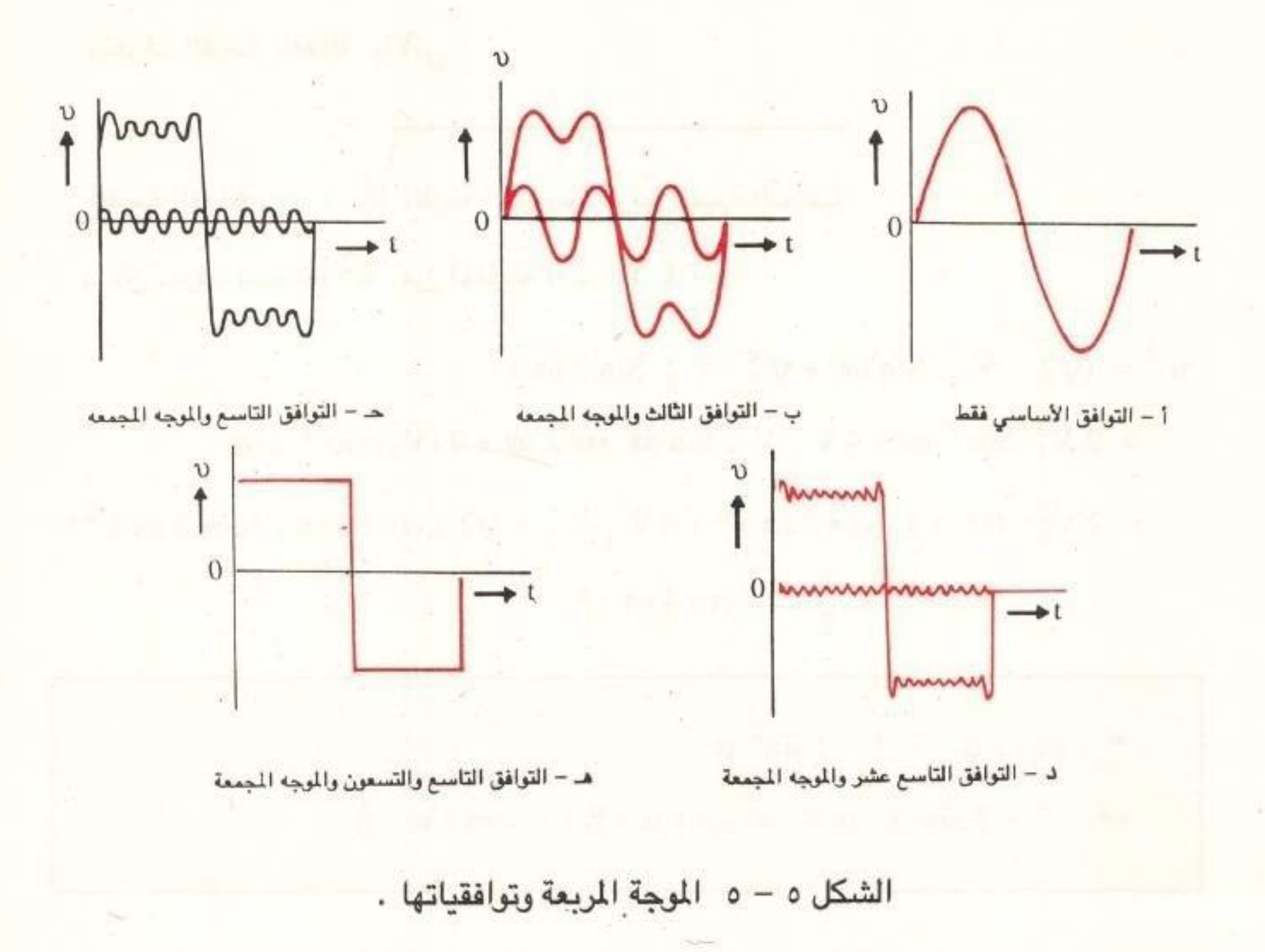
وهكـذا فإن الموجات عالية التردد بالنسبة للتوافق الأساسي تسمى بالتوافقيات العليا .



الشكل ٥ – ٤ الموجة المربعة Square wave

الشكل ٥ – ٥ (أ) يمثل موجة التوافق الأساسى ، كما أن الشكل ٥ – ٥ (ب) يتكون من موجة التوافق الأساسى وموجة التوافق الثالث .

كما نلاحظ أيضاً أن الشكل ٥ – ٥ (جـ) يتكون من موجات توافقية حتى التوافق التاسع . والشكل ٥ – ٥ (د) يمثل تجميع عدد من الموجات حتى التوافق التاسع عشر، وأخيراً فإن الشكل ٥ – ٥ (هـ) يتكون من تجميع موجات حتى التوافق التاسع والتسعين ، ويتضح من هذه الأشكال أن تجميع التوافقات عالية التردد تجعل الشكل الناتج من مجموعها يقترب من شكل الموجة المربعة .



الشكل ٥ - ٥ الموجة المربعة وتوافقياتها .

٥ - ١ - ٤ القيمـة الفعالة ومعامل التشويه Distortion factor للتيار المتغير ذى الموجة غير الجيبية

أ - القيمـة الفعالة Effective value

إن القيمـة الفعالة تستخدم للتعبير عن سعة الموجات الجيبية وغير الجيبية . وسوف يتم تحليل القيمة الفعالة لموجة الجهد الجيبية وغير الجيبية .

$$\upsilon = \sqrt{2}\ V_1\ \text{Sin}\ \omega t + \sqrt{2}\ V_2\ \text{Sin}\ 2\ \omega t \quad [\text{V}] \qquad (5-2)$$

وتعرف القيمة الفعالة بالآتي :

القيمة الفعالة = $\sqrt{\text{القيمة المتوسطة لمربع القيمة اللحظية}}$

والآن سوف نستنتج υ^2 من المعادلة (2 - 5) :

$$\upsilon^2 = (\sqrt{2}\ V_1\ \text{Sin}\ \omega t + \sqrt{2}\ V_2\ \text{Sin}\ 2\omega t)^2$$

$$= 2V_1^2\ \text{Sin}^2\ \omega t + 4V_1V_2\ \text{Sin}\ \omega t\ \sin 2\omega t + 2(V_2^2)\sin^2 2\omega t$$

$$= 2V_1^2\ 1/2\ (1 - \cos 2\omega t)^* + 4V_1V_2 \times 1/2\ \{\cos(-\omega t) - \cos 3\omega t\}^{**}$$
$$+ 2V_2^2 \times \frac{1}{2}(1 - \cos 4\omega t)^*$$

$$^*\quad \cos 2\alpha = 1 - 2\sin^2\alpha$$

$$^{**}\quad -2\sin\alpha\ \sin\beta = \cos(\alpha+\beta) - \cos(\alpha-\beta)$$

عنـد حسـاب القيمـة المتوسطـة لمربع الجهـد υ^2 فـى المعادلة السابقة على مدة زمنية دورية ، نجد أن الحدود التى تشمل $\cos(2\omega t)$, $\cos(-\omega t)$, $\cos(3\omega t)$, $\cos(4\omega t)$ تساوي صفراً، وهكذا فإن القيمة المتوسطـة للدالة υ^2 تكافئ $V_1^2 + V_2^2$ وحينـئذٍ فإن المـقدار الفعال $\{V\}$ V يستدل بالمعادلة الآتية :

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \qquad (5 - 3)$$

وعمومـاً فإن القيمة الفعالة للموجة غـير الجيبيـة للجهـد المتـردد والمكـون من التوافقيات العاليـة يشمـل القيم الفعـالة للجهـد المستـمر V_o والتوافقيـات V_1 ، V_2 ، V_3 .... كما يمكن وصفـه بالمعادلة الآتية :

$$V = \sqrt{V_o^2 + V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \ldots\ldots} \qquad (5 - 4)$$

مثال ١

احسب المقدار الفعال $\{V\}$ V للجهد .

$$\upsilon = \sqrt{2} \times 5 \sin \omega t + \sqrt{2} \times 4 \sin 2 \omega t + \sqrt{2} \times 3 \sin 3 \omega t \quad [V]$$

الحــل

لحساب قيم المعاملات V_0 , V_1 , V_2 , V_3 يتضح الآتي :

$$V_o = 0 , \quad V_1 = 5 V \quad , V_2 = 4 V \quad , V_3 = 3 V .$$

ولذلك فإن المقدار الفعال V يحسب كالآتى :

$$V = \sqrt{5^2 + 4^2 + 3^2}$$

$$= \sqrt{50} = 7.07 \ V$$

ب - معامل التشوية او الانحراف Distortion factor

بإستبعاد التوافق الأساسي ؛ يمكن إفتراض أن المقدار الفعال للتوافقيات الأعلى للموجة غير الجيبية للجهد المتردد يكون V_k $[V]$ الذي يمثل بالمعادلة الآتية :

$$V_k = \sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \ldots \ldots} \qquad (5-5)$$

وأن معامل التشويه أو الانحراف k يعرف بالنسبة المئوية للمقدار الفعال V_k مقسومًا على المقدار الفعال للتوافق الأساسي كما هو موضح بالمعادلة الآتية :

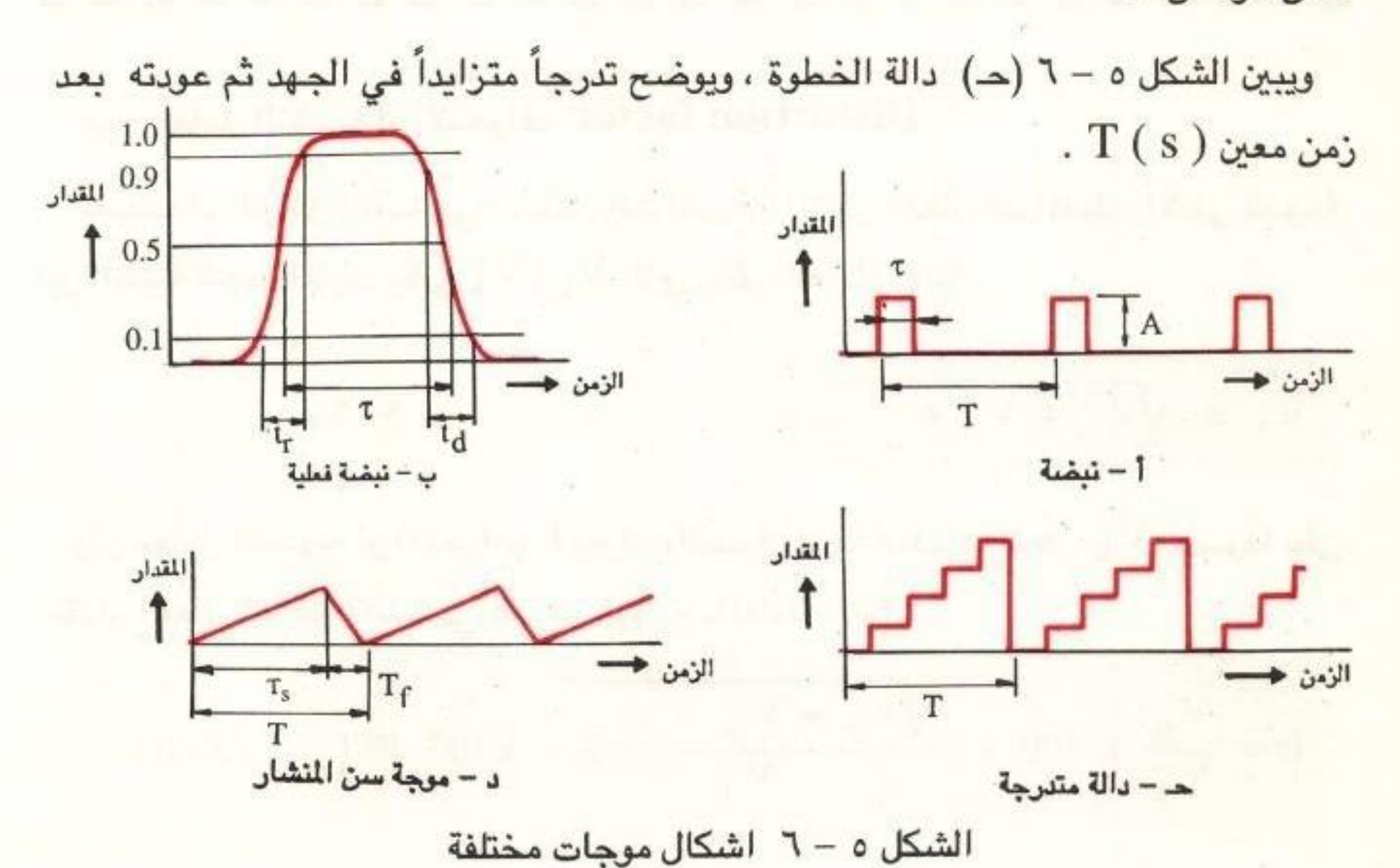
$$k = \frac{V_k}{V_1} \times 100 = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \ldots\ldots}}{V_1} \times 100 \ [\%] \qquad (5-6)$$

٥ – ١ – ٥ الاشكال الموجية المختلفة

توجد في الحياة العملية أشكال مختلفة من أنواع الموجات كما هو مبين في الشكل ٥ – ٦. ففي الشكل ٥ – ٦ (أ) نجد أن النبضة تتكون من جزء ثابت من الجهد المستمر الذى يتكرر كل مدة زمنية [S] T . ويكون عرض النبضة τ ومداها A ومدة تكرارها T والتردد التكرارى 1/T ويعرف المقدار τ / T بعامل التشغيل .

ويوضح الشكل ٥ – ٦ (أ) شكل موجة مثالية بينما يظهر الشكل ٥ – ٦ (ب) تغير شكل الموجة النبضية بعد مرورها بالدائرة . ويسمى المقدار t_r بزمن صعود النبضة ويعرف زمن صعود النبضة بالزمن الذى يحتاجه طول النبضة لكي يرتفع من 10% إلى 90% في الجزء الأول من النبضة . وكذلك في الجزء الأخير من النبضة فإن زمن هبوط t_d مماثل لزمن صعود النبضة . ويتأثر عرض النبضة بزمنى الصعود والهبوط ويزداد عرض النبضة كلما زاد هذان الزمنان .

ويبين الشكل ٥ – ٦ (حـ) دالة الخطوة ، ويوضح تدرجاً متزايداً في الجهد ثم عودته بعد زمن معين (S) T .



الشكل ٥ – ٦ اشكال موجات مختلفة

ويوضح الشكل ٥ – ٦ (د) شكل موجة سن المنشار التي يزداد جهدها خطيًا في المدة الزمنية [s] T_S ثم تهبط إلى القيمة الابتدائية خلال مدة زمنية T_f ويسمى T_S بزمن المسح و T_f بزمن الرجوع . .

سؤال ٣

من الشكل ٥ – ٦ (أ) . احسب التردد التكراري؛ وعامل التشغيل عندما يكون عرض النبضة 1 ميكروثانية ، والدورة التكرارية 100 ميكرو ثانية .

سؤال ٤

اشرح مجال التطبيق لكل أشكال الموجات المذكورة في الشكل ٥ – ٦ .

يستخدم شكل موجة النبضة في عمل الحاسوب ؛ لان المعلومات في الحاسوب تستبدل بأعداد من النبضات لتمثل أشارات الإدخال التي يتم إجراء العمليات اللازمة عليها لتجهيز إشارات الإخراج كأرقام عددية ، أو إشارات ضوئية أو حركة ميكانيكية .

وتستخدم أيضاً الإشارات النبضية في عمل أجهزة الرادار والاستقبال التلفزيوني .

٥ – ٢ الظاهرة العابرة الكهربائية Transient phenomenon

في الدوائر الكهربائية التى تتكون من المكثفات الكهروستاتيكية وملفات الحث ، يختلف شكل موجة التيار عند لحظة فتح الدائرة عن شكله بعد الفتح واستقرار الدائرة .

والمثال على ذلك يتضح من الدائرة الموضحة بالشكل ٥ – ٧ (أ) حيث نجد أن التيار يمر

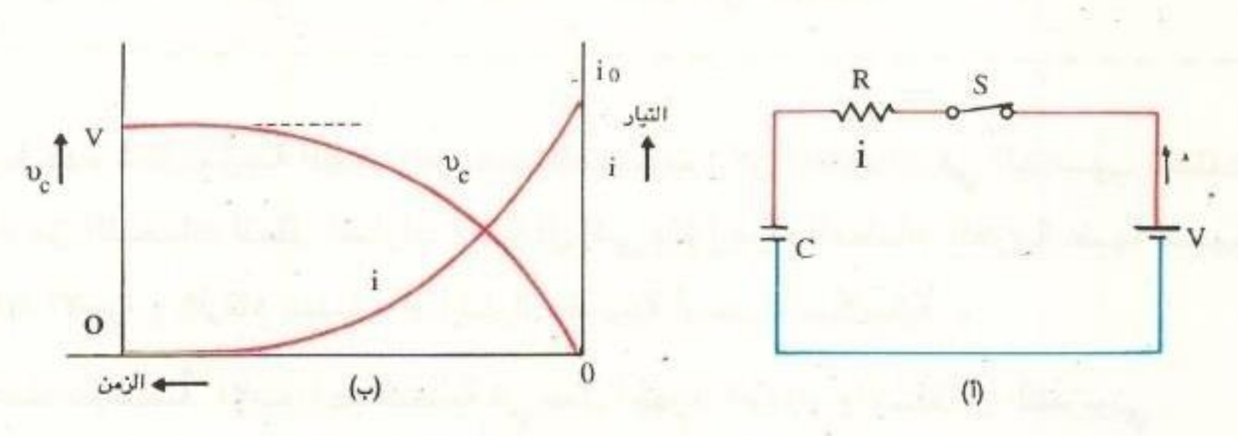
لحظة الفتح ولايمر بعد زمن معين عندما يكتمل شحن المكثف . وتسمى حالة الدائرة عندما تثبت قيمة التيار بالحالة الثابتة أو المستقرة . وتعرف الحالة العابرة للدائرة بحالتها من بدء مرور التيار وحتى لحظة استقرار التيار المار بالدائرة .

وفى البند التالي سوف نتناول تحليل ظاهرة الحالة العابرة .

٥ – ٢ – ١ الظاهرة العابرة للدائرة RC

أ – الظاهرة العابرة لدائرة التوالي RC

إن تطبيق جهد ثابت DC [V] V على دائرة توالي RC كما هو موضح بالشكل ٥ – ٧ (أ) يجعل التيار [A] i يمر في المقاومة [Ω] R ويؤدى إلى شحن المكثف [F] C فيظهر نتيجة لذلك جهد عليه مقداره V_C[V] .



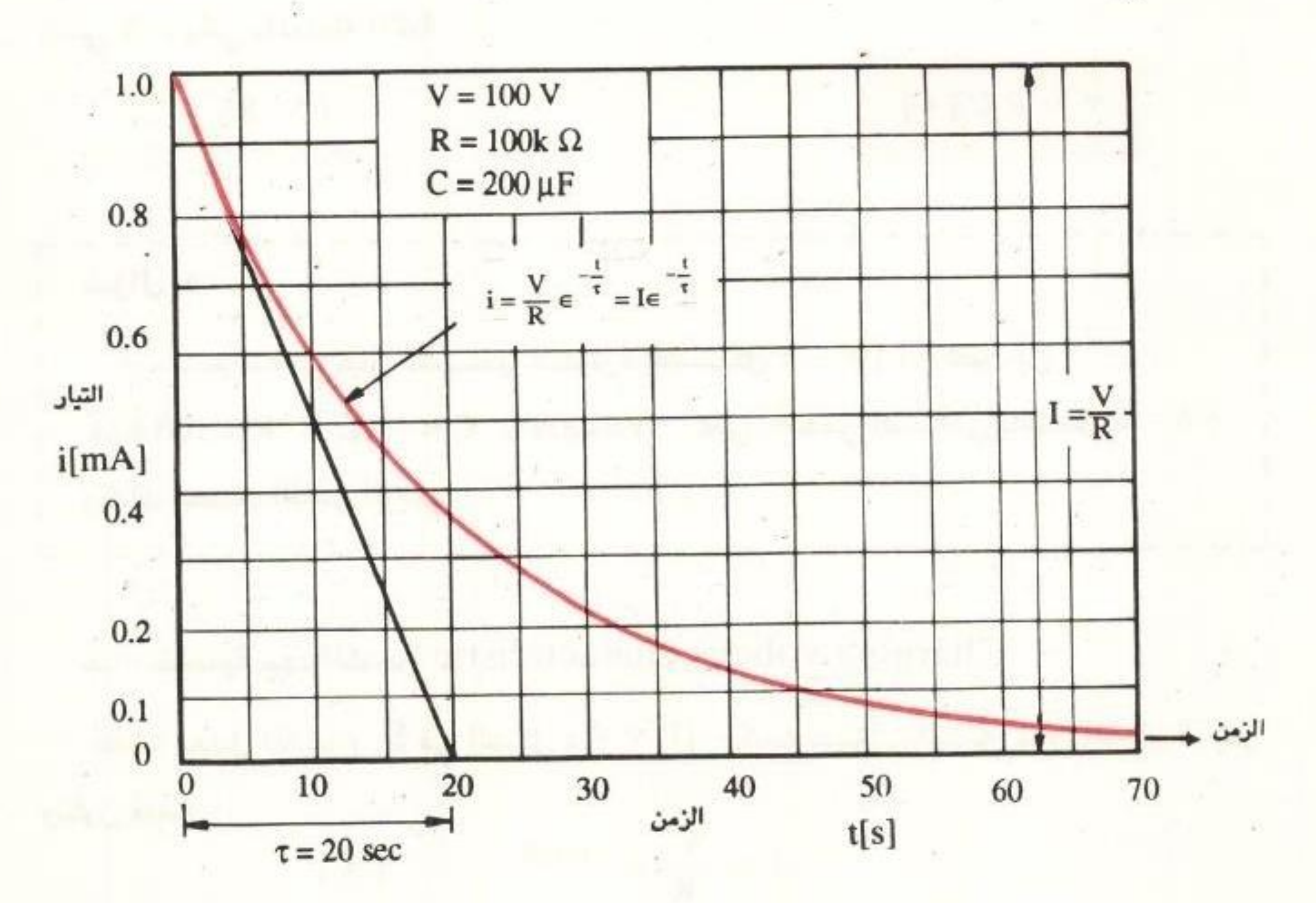
الشكل ٥ – ٧ الظاهرة العابرة لدائرة توالي RC .

والآن بجعل مفتاح التشغيل S فى وضع التشغيل في الدائرة الموضحة بالشكل ٥ – ٧ (أ) ، فإن التيار [A] i يمر في الدائرة، وتكون قيمته الابتدائية i_0 ثم يتناقص مع الزمن حتى يتلاشى وتصبح قيمته صفرًا كما هو موضح بالشكل ٥ – ٧ (ب) . ويقاس الزمن العابر بالزمن المحصور بين القيمة الابتدائية والقيمة النهائية للتيار . وهكذا تظهر الظاهرة خلال الزمن العابر .

الجهد الواقع على المكثف $v_C[V]$ يزيد تدريجيًا من القيمة الابتدائية 0V حتى يصل إلى جهد المنبع [V] V . في هذه الحالة فإن القيمة الابتدائية لجهد المكثف Vc تكون مساوية 0V والقيمة النهائية مساوية [V] V .

ب - خاصية تيار الشحن Charging current characteristic

إن الشكل ٥ - ٨ يبين خاصية منحنى التيار - الزمن عندما يكون جهد المنبع V=100V ، R = 100 k Ω ، C = 200 µF في الدائرة الموضحة في الشكل ٥-٧ (أ) .



الشكل ٥ - ٨ خاصية تيار الشحن للدائرة RC

وفي حين يعبر هذا المنحنى عن خاصية تيار الشحن يعبر عن المنحنى الأسي رياضيًا بالمعادلة الآتية :

$$i = \frac{V}{R} \in^{-t/CR} = I \in^{-t/CR} \qquad (5-7)$$

وفى هذه المعادلة تمثل $\in$ الأساس للوغاريتم الطبيعى، وتساوى عدديا (2.718). τ تسمى الثابت الزمنى للدائرة وترمز لسرعة التغير في الحالة العابرة ، ويقاس الثابت الزمنى بيانيا بالقيمة $\tau = \overrightarrow{op}$ حيث P هى نقطة تقاطع المحور الزمنى وخط المماس المرسوم من النقطة الابتدائية ($i = 1mA$) كما هو موضح بالشكل ٥ – ٨ . كما أن الدائرة المرسومة بالشكل ٥ – ٧ (أ) والمكونة من R {Ω} والمكثف C [F] لها ثابت زمني τ ، يأتي بالمعادلة الآتية :

$$\tau = RC [s] \qquad (5-8)$$

سؤال ٥

ارسم منحنى تيار الشحن لدائرة الشكل ٥ – ٧ (أ) حيث إن $V=100V$ ، $C = 100\mu F$ ، $R = 100 K\Omega$ على المنحني البياني بالشكل ٥ – ٨ ؛ وكذلك احسب الثابت الزمني .

حـ – خاصية جهد الشحن Charging voltage characteristic

عندما يعمل المفتاح S في الشكل ٥ – ٧ (أ) – كما سبق دراسته فإن التيار i يمر وتكون قيمته :

$$i = \frac{V}{R} \in^{-t/CR} \qquad [A]$$

وحينئذ يعبر عن الجهد $V_R[V]$ على المقاومة R بالمعادلة .

$$\upsilon_R = Ri = R\frac{V}{R}\in^{-t/CR} = V\in^{-t/CR} \qquad (5-9)$$

ومن ناحية أخرى فإن الجهد $V_C[V]$ الواقع على المكثف يحسب بفرق الجهدين (جهد منبع التغذية $[V]$ V والجهد الواقع على المقاومة $R\ [\Omega]$) ويعبر عنه بالعلاقة :

$$\upsilon_c = V - \upsilon_R = V - V\in^{-t/CR}$$

$$\upsilon_c = V\ (1-\in^{-t/CR}) \qquad (5-10)$$

إن الحد الأول V في المعادلة (10 - 5) يمثل قيمة الجهد في الحالة المستقرة، وكذلك الحد الثانى $V\in^{-t/RC}$ يمثل الجهد في الحالة العابرة ، وهكذا فإن الحد الأول يسمى الحد المستقر والحد الثانى يسمى الحد العابر .

سؤال٦

ارسم خواص جهد الشحن للدائرة الموضحة بالشكل ٥ – ٧ (أ) و التي لها $R = 100\ K\Omega$, $C = 200\ \mu F$, $V = 100\ V$ على الشكل البيانى المبين بالشكل ٥ – ٨

٥ – ٢ – ٢ الدائرة التفاضلية والدائرة التكاملية

إن الدائرة التفاضلية والدائرة التكاملية المكونتان من المقاومة R والمكثف C ، تستخدمان على نطاق واسع في الدوائر الخاصة بمعالجة النبضات والظاهرة العابرة .

أ – الدائرة التفاضلية Differential circuit

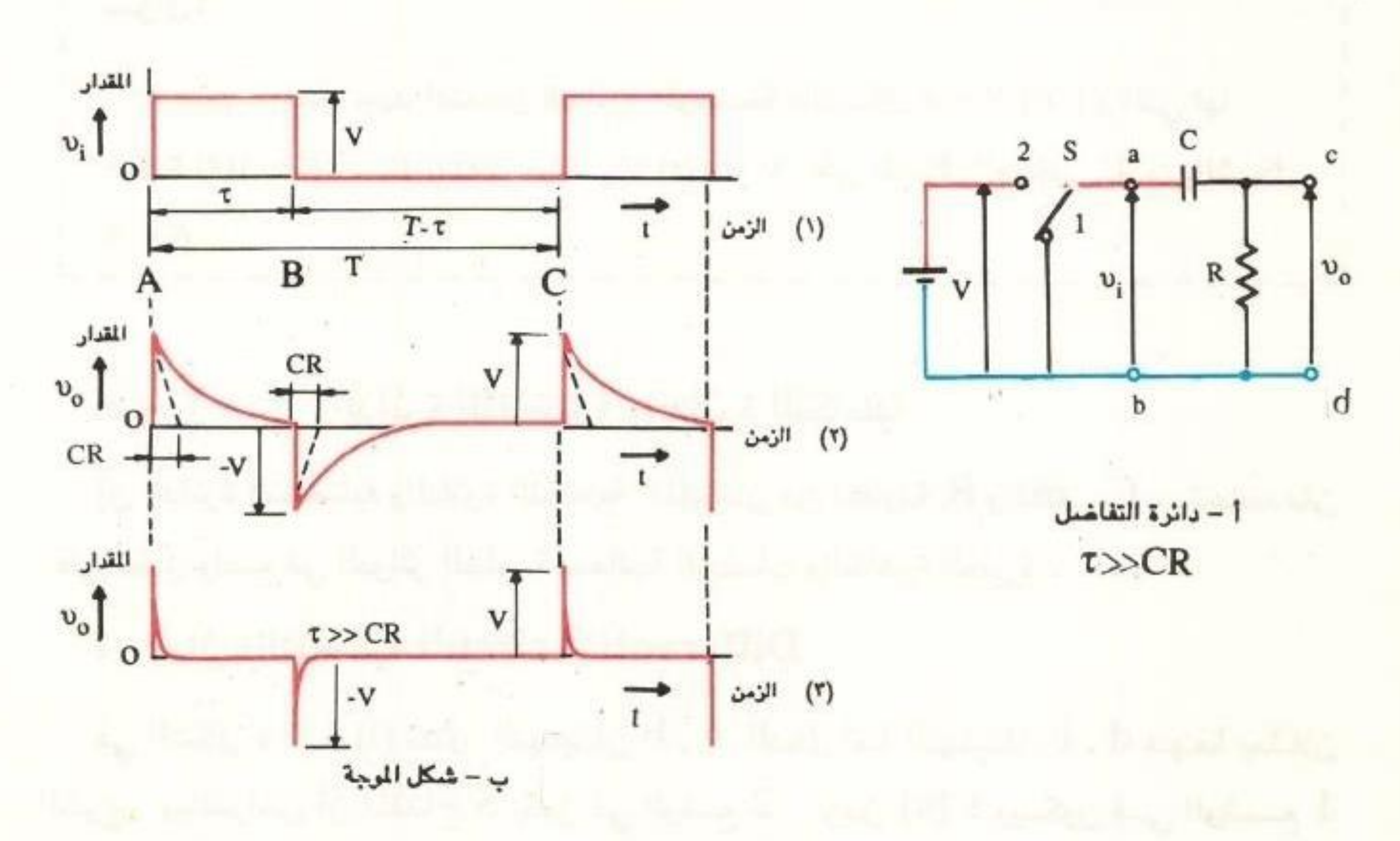
في الشكل ٥ – ٩ (أ) تمثل النهايتان a , b الدخل أما النهايتان d , c فهما يمثلان الخرج. وبافتراض أن المفتاح S يكون في الوضع 2 لزمن τ [s] ويكون في الوضع 1

لـزمـن [s] (T - τ) . وأن تكرار هذا الوضع يعطي جـهـد الدخل $V_i[V]$ الموضح بالمنحنى (١) في الشكل ٥ – ٩ (حـ) .

وفي هذه الحالة فإن تيار الشحن يمر في المقاومة [Ω]R عند الأزمنة C, A بالمنحنى (١) من الشكل ٥ – ٩ (ب) وتيار التفريغ يمر عند الزمن B . حينئذ يكون جهد الخرج $v_O[V]$ كما هو موضح بالمنحنى (٢) من الشكل ٥ – ٩ (ب) .

بالإضافة إلى ذلك فإن عرض شكل الموجة يختلف طبقًا لقيم الثابت الزمنى CR .

إن القيم الصغيرة جدًا للثابت الزمني [s] CR بالمقارنة بالمدة الزمنية [s] τ تؤدي إلى ظهور الجهد v_O المبين بالمنحنى (٣) من الشكل ٥ – ٩ (ب) . وبمقارنة المنحنيات (١) مع (٣) في الشكل ٥ – ٩ (ب) يتضح أن تغير جهد الدخل $v_i[V]$ يجعل جهد الخرج $v_O[V]$ يظهر بهذه الصورة . هذه الدوائر تسمى الدوائر التفاضلية *



الشكل ٥ – ٩ عمل دائرة التفاضل .

* فى الدائرة التفاضلية ، المعادلة المعبرة عن شكل موجة الخرج تمثل بالمعادلة الناتجة عن تفاضل موجة الدخل .

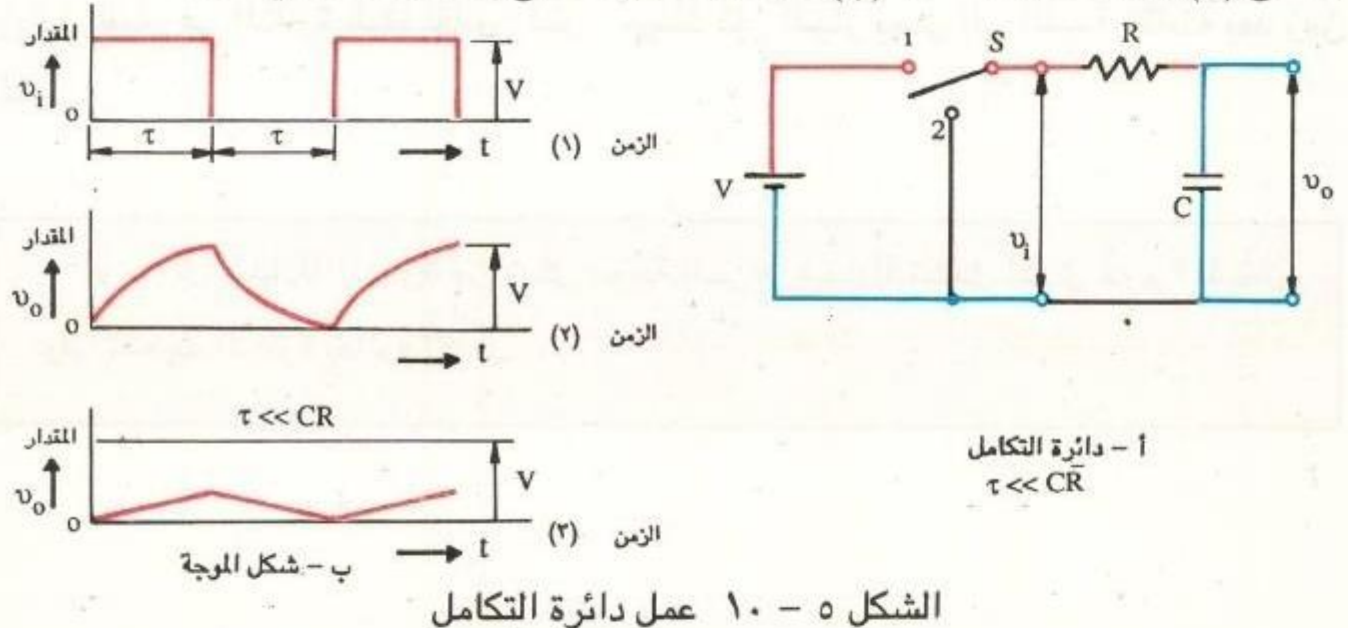
سؤال ٧

ماسبب حدوث النبضة الموجبة عند النقطة A والنبضة السالبة عند النقطة B في المنحنى (٣) بالشكل ٥ - ٩ (ب) .

ب - الدائرة التكاملية Integral circuit

إن جهد الدخل $v_i[V]$ يتغير بفتح وقفل المفتاح S المبين في الشكل ٥ - ١٠(أ) ويمثل بالمنحنى (١) بالشكل ٥ - ١٠ (ب) . وكذلك جهد الخرج $v_o[V]$ المبين بالمنحنى (٢) من الشكل ٥ - ١٠ (ب) .

فى هذه الحالة يكون الثابت الزمنى CR [s] أعلى من عرض النبضة $\tau[s]$ وهو يجعل جهد الخرج v_o يزداد بالتناسب مع مضروب جهد الدخل v_i والزمن t كما هو مبين في المنحنى (٣) من الشكل ٥ - ١٠ (ب) . وهذه الدائرة تسمى بالدائرة التكاملية *.



الشكل ٥ - ١٠ عمل دائرة التكامل

سؤال٨

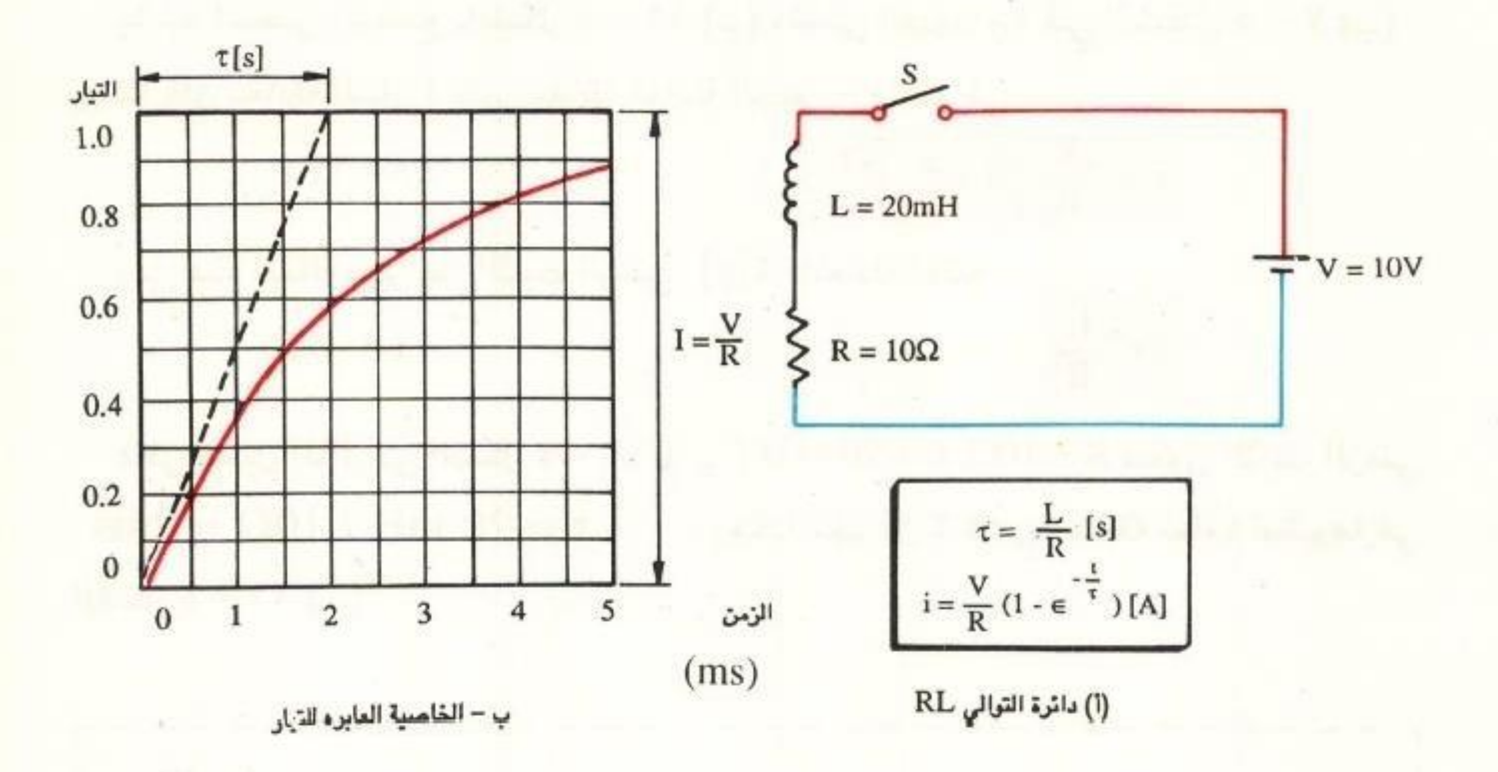
ارسم منحنى الجهد – الزمـن كالمنحنى (٣) من الشـكل ٥ – ١٠ (ب) عندما يكـون $V = 10V$, $CR = 1\, ms$, $t = 10\, \mu$ للدائرة الموضحة بالشكل ٥ –١٠ (أ) .

٥ – ٢ – ٣ الظاهرة العابرة للدائرة R L

تطبيق جهد التيار المستمر [V] Vلدائرة موصلة على التوالي بمقاومة [Ω]R ومؤثر حثى [L[H يجعل التيار الكهربائى يزيد الجهد المولد في المؤثر الحثى L مما ينتج الظاهرة العابرة للدائرة .

ويبين الشكل ٥ – ١١ (ب) خواص منحنى التيار العابر الناتج في الدائرة R L الموضحة بالشكل ٥ – ١١ (أ) ، حيث نجد في هذه الدائرة أن $R = 10\Omega$,$L = 20m\, H$ عند وضع المفتاح S في وضع التشغيل يكون منحنى التيار i كما هو بالشكل ٥ – ١١ (ب) . ويتضح أن التيار i يصل بعد 5 ms بالقرب من $I = V/R = 10V/10\Omega = 1A$ طبقًا لقانون أوم للتيار الثابت . ومع أن التيار يزيد طرديًا خلال الزمن العابر ، إلا أن الملف L يولد جهداً يمنع زيادة التيار في الدائرة طبقًا لقانون لينز . حينئذ فإن التيار يصل إلى القيمة الثابتة بعد زمن كبير .

* وتمثل المعادلة المعبرة من شكل موجة الخرج معادلة تكامل لشكل موجة الدخل ولذا سميت الدائرة بدائرة تكامل .



ب – الخاصية العابرة للتيار

(أ) دائرة التوالي RL

الشكل ٥ – ١١ تجربة لحظية لشرح الخاصية العابرة لدائرة التوالي R L

إن القيم الكبيرة للملف L في دائرة التوالي RL تولد جهداً عابراً كبيراً مما يمنع زيادة التيار فيأخذ زمناً كبيراً ليصل إلى الحالة الثابتة .

سؤال٩

اجعل مقاومة الملف 100 Ω فى الدائرة الموضحة بالشكل ٥ – ١١ (أ) ثم أحسب قيم التيار الابتدائية والنهائية .

خاصية التيار في دائرة التوالي RL

يشبه المنحنى الموضح بالشكل ٥ – ١١ (ب) منحنى الجهد v_C في الشكل ٥ – ٧ (ب) .
وهكذا فإن معادلة التيار i تكون مماثلة لمعادلة الجهد v_C كما يلى :

$$i = \frac{V}{R} \left(1 - \epsilon^{-t/\tau}\right) \qquad (5-11)$$

وفي هذه الحالة يعبر عن الثابت الزمنى $\tau[s]$ بالمعادلة الآتية :

$$\tau = \frac{L}{R} \qquad (5-12)$$

فعلى سبيل المثال فى الشكل ٥ – ١١ (ب) $R = 10\Omega, L = 20\ mH$ فيكون الثابت الزمني $\tau = 20\ mH / 10\Omega = 2ms$. وهكذا نجد أن τ تكون مطابقة تمامًا لنظيرها في الشكل ٥ – ١١ (ب) .

سؤال ١٠

احسب الثابت الزمنى للملف $L = 40\ mH$ والمقاومة $R = 10$ في الدائرة الموضحة بالشكل ٥ – ١١ (أ) . كذلك ارسم منحنى الخاصية العابرة كما هو موضح بالشكل ٥ – ١١ (ب) .

سؤال ١١

نفترض أن الدائرة بالشكل ٥ – ١١ (أ) تشتمل على $V=100V, L=80mH, R=10\Omega$.
اكتب معادلة التيار كما هو مبين بالمعادلة (12 - 5) .

كذلك ارسم منحنى الخاصية العابرة للتيار i كما هو موضح بالشكل ٥ – ١١(ب) .

تماريـــن

١ – بأفتراض أن الجهـد :

$$\upsilon = 10 \sin 1000\, \pi t + 2 \sin 2000\, \pi t + 0.5 \sin 3000\, \pi t \ [\,V\,]$$

حينئذٍ احسب المتغيرات التالية :

١) القيمة الفعالة للتوافق الأساسي .

٢) القيم الفعالة للتوافق الثانى والثالث .

٣) القيمة الفعالة الكلية للموجة غير الجيبية .

٤) تردد التوافق الأساسي والثاني .

٥) عامل التشويـــة (الانحراف).

٢ – بفرض أن التيار يأخذ الشكل الأتي :

$$i = 10 \sin (\, 1000\, \pi t + \pi / 3\,) + 5 \sin 2000\, \pi t + 0.4 \sin (\, 3000\, \pi t + \frac{\pi}{6}\,)$$

تحت تأثير الجهد المذكور نفسه في السؤال الأول ، احسب المتغيرات التالية :

١) القيمة الفعالة لموجة التيار غير الجيبية .

٢) القيم الفعالة للتوافق الثانى والثالث .

٣ – ارسم شكل موجة الجهد غير الجيبية والممثلة بالمعادلة التالية ؛ ثم احسب القيمة الفعالة وعامل التشويه (الانحراف) .

$$\upsilon = 10\sqrt{2}\ \sin \omega t + \frac{10}{3}\sqrt{2}\ \sin 3\,\omega t + 2\sqrt{2}\ \sin 5\,\omega t \quad [\,V\,]$$

٤ – قارن بين حساب الثابت الزمنى CR وعرض النبضة τ في دائرة التفاضل .

٥ – قارن بين حساب الثابت الزمنى CR وعرض النبضة τ في دائرة التكامل .

٦ – اشرح طريقة لتوليد موجة سن المنشار .

٧ – بفرض أن جـهد تيـار ثابت موصل بدائرة توالي من $R\ [\Omega]$, $C[F]$. ارسم شكل يوضح خاصية التيار – الزمن .

٨ – احســـب الثابـــت الزمـــنى في دائـــرة التـــوالي التى تتكـــون مـــن المقاومـة $R=1M\ \Omega$ والمكثـف $C = 1\ \mu\ F$.

٩ –احسب الثابت الزمنى في دائرة التوالي التى تتكون من المقاومة $R = 2\ \Omega$ والمـــــلف $L = 200\ m\ H$.

١٠ – افترض أن التيار المار في دائرة التوالي $R\ L$ كما يلى :

$$i = \frac{V}{R}\ (1 - \epsilon^{-t/\tau}) \qquad [A]$$

اكتب معادلتي الجهدين v_L , v_R.

الفصل السادس
اشباه الموصلات والدوائر الإلكترونية
Semiconductors and electronic circuits

يسمى العصر الحاضر عصر الإلكترونيات ، ونحن نرى أجهزة إلكترونية كثيرة مثل التلفزيون وأجهزة الموسيقى والاستريو وأجهزة التسجيل والحواسيب ؛ أضف إلى ذلك استخدام الإلكترونيات في التحكم في عمل الماكينات وتشغيل الإنسان الآلى (الروبوت) .

وقد أمكن تطبيق الالكترونيات بطريقة مفيدة في مجالات واسعة جداً ، ومن المتوقع تطورها بسرعة تتناسب مع تطوير أى مواد أو تقنيات جديدة .

وتقع أشباه الموصلات والدوائر الإلكترونية عند مركز الإلكترونيات بتطبيقاتها الواسعة . وفى هذا الفصل سوف ندرس الخواص الأساسية لأشباه الموصلات وكيفية تركيب واستخدام الثنائيات والترانزستورات والدوائر الالكترونية المختلفة .

٦ – ١ أشباه الموصلات والثنائى Diode

٦ – ١ – ١ الذرة والالكترون Atom and electron

تتكون المادة من مجموعة من الجزيئات . ويتكون الجزيء من ذرات ؛ وتحتوي الذرة على نواة لها شحنة موجبة في المركز وعلى إلكترونات ذات شحنات سالبة تدور حول النواة . وتسمى المدارات التى تدور فيها الالكترونات بغلاف الإلكترون، وتأخذ أسماء غلاف K وغلاف L وغلاف M ... بدءاً من الداخل . ويتحدد عدد الالكترونات المسموح له بالدوران في كل مدار بالمعادلة :

$$n = 2\ N^2 \qquad (6 - 1)$$

عدد الالكترونات التي يستطيع كل غلاف أن يحتويها

غلاف K	2
غلاف L	8
غلاف M	18
غلاف N	32

(أ) الهليوم (ب) الليثيوم (ج) السيليكون

الشكل ٦ – ١ تركيب عدة ذرات .

حيث N هو رقم المدار (1 , 2 , 3 ... من الداخل) . وفي المدار K يستطيع 2 إلكترون) ($2x1^2$) الدوران أما في المدار L فيستطيع 8 إلكترونات ($2x2^2$) الدوران . وتسمي الإلكترونات التي تدور في أقصى مدار خارجي إلكترونات التكافؤ .

سؤال ١

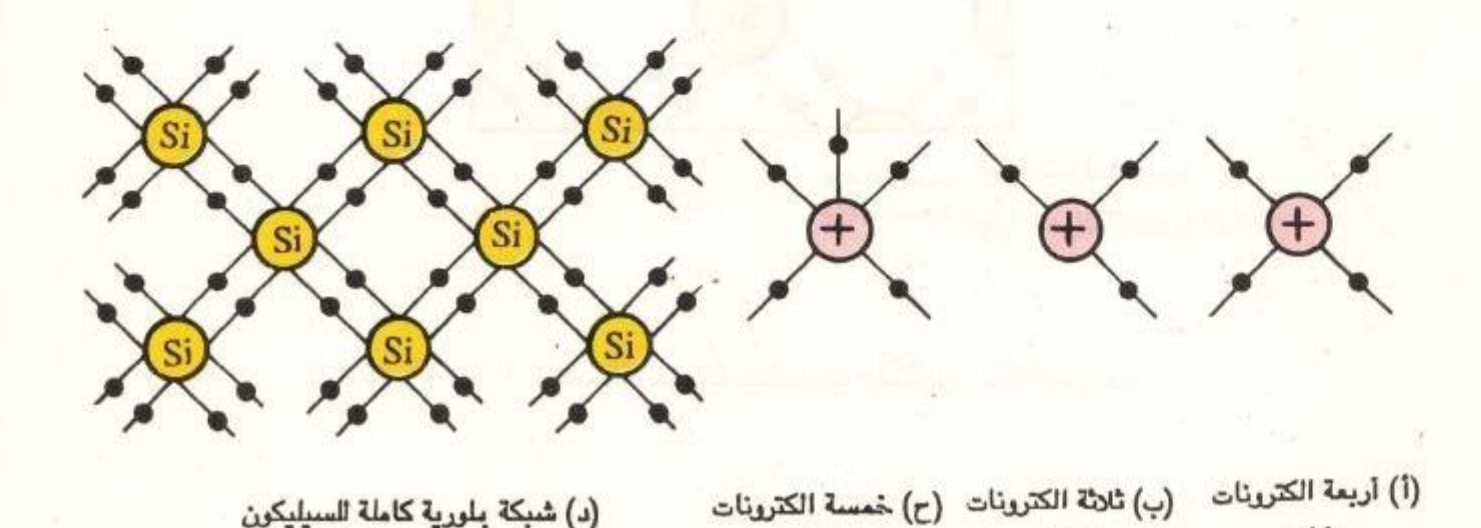
احسب عدد الإلكترونات المسموح لها بالدوران في غلاف M .

٦ – ١ – ٢ أشباه الموصلات

أ – أشباه الموصلات الذاتية Intrinsic semiconductors

يحتوى كل من السيليكون (Si) والجرمانيوم (Ge) على أربعة إلكترونات تكافؤ وتحتوي كل ذرة منها على إلكترونات تكافؤ تمكنها من تكوين بلورة . وتسمى هذه الحالة بالرابطة التساهمية، ويبين الشكل ٦ – ٢ (أ) إلكترونات التكافؤ للرابطة التساهمية. أما الشكل ٦ –٢ (ب) والشكل ٦ – ٢ (ج) فيوضحان ثلاثة وخمسة الكترونات تكافؤ على الترتيب .

ويبين الشكل ٦ – ٢ (د) رسم سطحى للبلورة المفردة، وهي بلورة تتكون من سيليكون أو جرمانيوم فقط ولها أربعة إلكترونات تكافؤ . وعلى الرغم أن إلكترونات التكافؤ تنجذب إلى نواة الذرة في درجات الحرارة المنخفضة بالقرب من (0K) فإنها تترك النواة وتتحرك بين الذرات متأثرة بالطاقة الحرارية عند درجة الحرارة العادية ($20^{O}C$) . وهذا النوع من الإلكترونات يسمى الإلكترون الحر وينقل الكهرباء ، ويزيد عدد الإلكترونات الحرة مع زيادة درجة الحرارة .

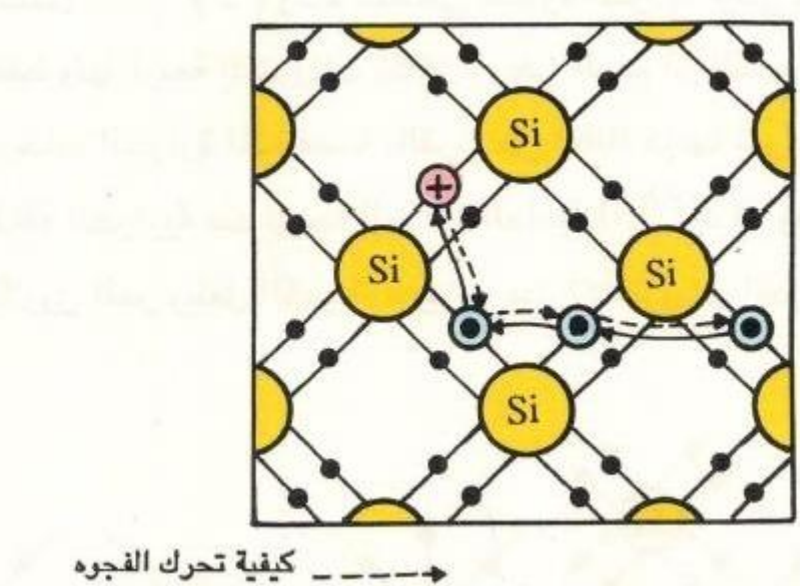


(أ) أربعة الكترونات تكافؤ (ب) ثلاثة الكترونات تكافؤ (ج) خمسة الكترونات تكافؤ (د) شبكة بلورية كاملة للسيليكون

الشكل ٦ – ٢ الكترونات التكافؤ Valence electrons

عندما يترك الإلكترون سالب الكهرباء مكانًا فإن هذا المكان يصبح موجب الكهرباء ويسمى فجوة . وتعامل الفجوة كأنها جسيم له شحنة كهربائية موجبة تساوى قيمة شحنة الالكترون . ويبين الشكل ٦ – ٣ حركة الفجوة ، ويسمى الالكترون أو الفجوة التي تحمل الكهربائية «الحامل».

والمواد مثل السيليكون والچرمانيوم، وتلك المخلوطة بقليل من الشوائب لها مقاومة نوعية بين الموصلات والعوازل (أي إنها أشباه موصلات) وتقل مقاومتها النوعية عند تعرضها للطاقة الضوئية أو الحرارية . وهذه المواد هى أشباه الموصلات ، وشبه الموصل له أداء تقويمى وتأثير (هول) كبير .



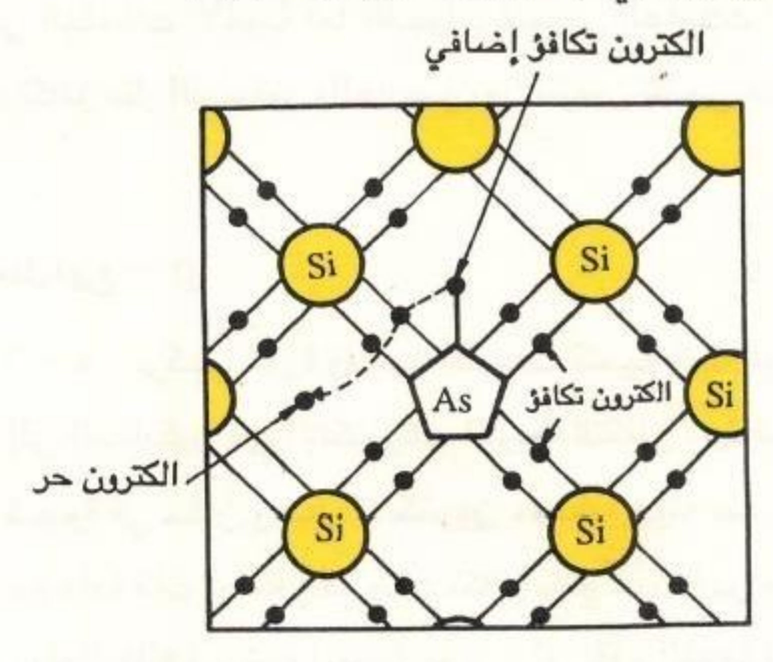
الشكل ٦ – ٣ شبكة بلورية ينقصها إلكترون تكافؤ واحد

ويتطلب إنتاج أدوات أشباه الموصلات بلورة Crystal مفردة من السيليكون أو الچرمانيوم بدرجة نقاء عالية جدا . . . 99.999% (تسمى إحدى عشر تسعة) . وشبه الموصل الذاتي له هذه الدرجة من النقاء .

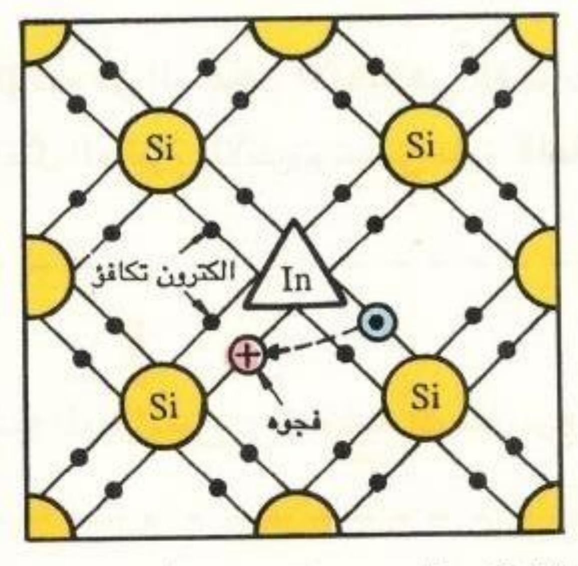
ب – شبه الموصل ذو الشوائب Impurity semiconductor

(١) شبه الموصل نوع – n

يبين الشكل ٦ – ٤ تركيب البلورة ، وفيه أضيفت كمية قليلة من الزرنيخ الذى له خمسة إلكترونات تكافؤ إلى السيليكون ذي الإلكترونات الأربعة للتكافؤ .



الشكل ٦ – ٤ شبه موصل نوع – n



الشكل ٦ – ٥ شبه موصل نوع – p .

ويستطيع الإلكترون الحر أن يتحرك بسهولة عند تسليط جهد عليه . وفى حالة شبه الموصل نوع – n يمكن بإضافة كمية قليلة من مادة لها خمسة إلكترونات تكافؤ إلى مادة أخرى لها أربعة إلكترونات تكافؤ فإن الالكترونات ذات الكهرباء السالبة تقوم بحمل الكهرباء . ويحتوي شبه الموصل نوع – n على كمية قليلة من الفجوات عند درجة الحرارة العادية . ولهذا فإن الإلكترونات تسمى الحاملات الأغلبية أما الفجوات فتسمى الحاملات الأقلية . والمادة التى لها خمسة إلكترونات تكافؤ مثل الفوسفور والخارصين والأنتيمون تسمى مادة "مانحة" .

(٢) شبه الموصل نوع – p

يبين الشكل ٦ – ٥ تركيب بلورة وفيها أضيفت كمية قليلة من الأنديوم الذي له ثلاثة إلكترونات تكافؤ إلى السيليكون ذي الإلكترونات الأربعة للتكافؤ . وتولد الذرة ذات الإلكترونات الثلاثة للتكافؤ فجوة في مكان رحيل الإلكترون . وهكذا فإنه عند مزج مادة تحوي ثلاثة الكترونات تكافؤ مع مادة ذات أربعة إلكترونات تكافؤ ينتج عدد كبير من الفجوات التي تصبح حاملات للكهرباء . ولهذا فإنه في شبه الموصل نوع – p تقوم الفجوة الموجبة الكهربائية بحمل الكهرباء .

وفى شبه الموصل نوع – p نجد أن الحاملات الأغلبية هي الفجوات، والحاملات الأقلية هى الإلكترونات . ومادة الشوائب مثل الجاليوم والأنديوم تسمى مادة "قابلة" .

سؤال٢

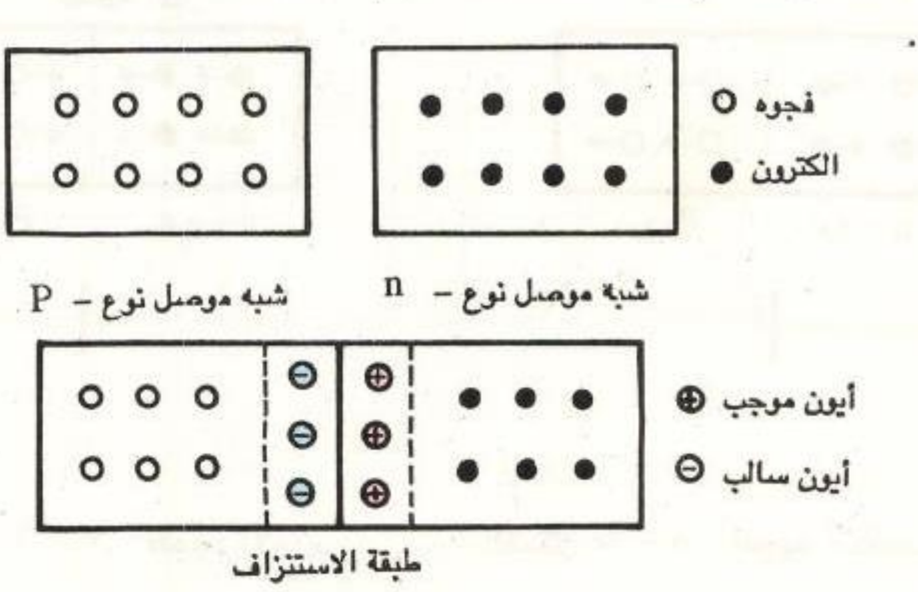
ما الحاملات الأغلبية في شبه الموصل نوع – p وشبه الموصل نوع – n ؟

٦ – ١ – ٣ الثنائـــي (وصلة – pn)

وصلة – pn هي منطقة بين شبـه مـوصل نوع – p وشبـه مـوصل نوع – n تم تكوينها بإضافة مادة قابلة ومادة مانحة إلى بلورة مفردة من السيليكون أو الجرمانيوم ذات نقاء عال . وحول حدود وصلة – pn تسرى الفجوات (الحاملات الأغلبية في المنطقة نوع – p) في اتجاه المنطقة نوع – n ، أما الإلكترونات (الحاملات الأغلبية في المنطقة نوع – n) فتسرى فى اتجاه المنطقة نوع – p ، وهذه الحركة للحاملات المتسببة عن فرق كثافتها في المنطقتين تسمى "الانتشار" .

ويبين الشكل ٦ – ٦ أن الانتشار ينتج أيونات موجبة حول حدود منطقة n وأيونات سالبة حول حدود منطقة p . وتقوم الأيونات السالبة بمنع انتشار الإلكترونات من شبه الموصل n وتقوم الأيونات الموجبة بمنع انتشار الفجوات من شبه الموصل p . وتعمل هذه الأيونات كعائق لمنع انتشار الحاملات وتوجد توازنًا بين حركة الحاملات .

تنشأ طبقة استنزاف حول الحدود بعد حدوث التوازن وتحتوى هذه الطبقة على أيونات فقط دون الحاملات . وعلى جانبي طبقة الاستنزاف يتم الفصل بين الحاملات الأغلبية ، الفجوات والإلكترونات .



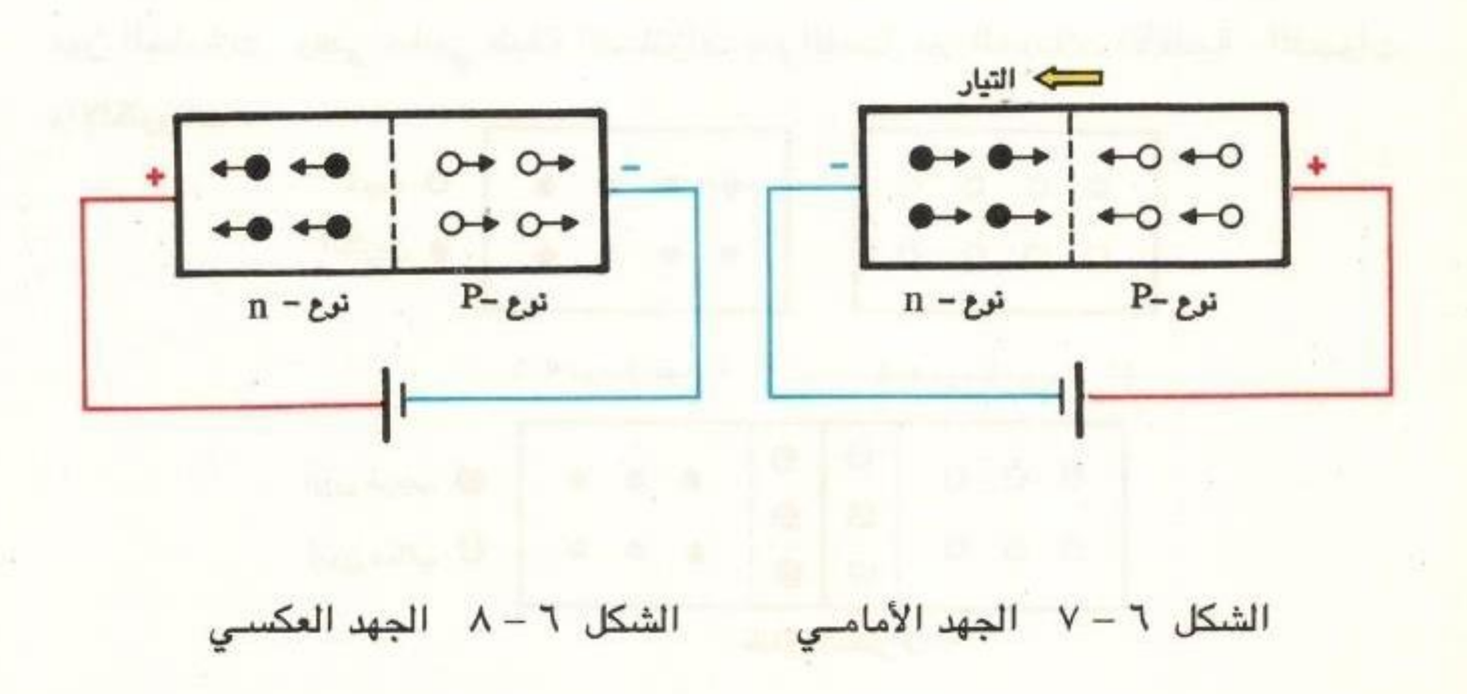
الشكل ٦ – ٦ وصلة – pn

أ - الجهد الامامي والعكسي Forword and reverse voltage

عند توصيل جهد إلى وصلة - pn كما في الشكل ٦ - ٧ تتحرك الفجوات من منطقة p إلى منطقة n بتأثير قوة تنافر الجهد الموجب. كما تتحرك الإلكترونات من منطقة n إلى منطقة p بتأثير قوة تنافر الجهد السالب . وإذا زاد الجهد على قيمة معينة تسرى الحاملات في المنطقة الأخرى فيما وراء العائق وينشأ عن ذلك مرور تيار كهربائي . وهذا النوع من الجهد يسمى "الجهد الأمامي" . وتدفق الفجوات من منطقة p إلى منطقة n، وتدفق الإلكترونات من منطقة n إلى منطقة p يسمى "الحقن" .

وعند توصيل جهد إلى وصلة - pn كما في الشكل ٦ - ٨ ينجذب نوعي الحاملات إلى كل نهاية بمفرده ولايحدث الحقن ولايمر تيار . وهذا النوع من الجهد يسمى "الجهد العكسي .

نستنتج من ذلك أن وصلة pn تسمح للتيار بالمرور في أحد الاتجاهات ولاتسمح له بالمرور في الاتجاه العكسي . أى أنها تؤدي عملية تقويم .

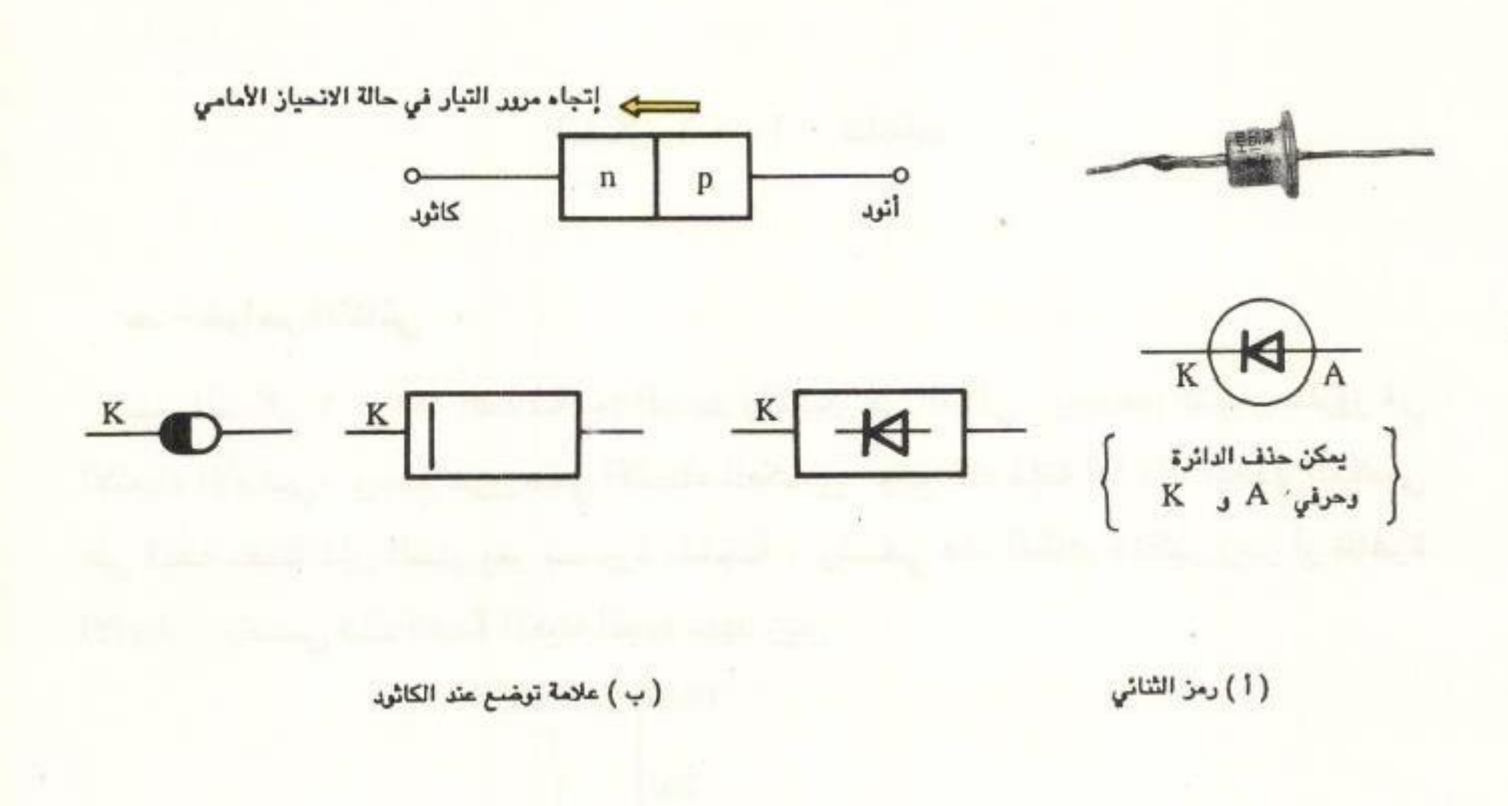


الشكل ٦ - ٧ الجهد الأمامي

الشكل ٦ - ٨ الجهد العكسي

ب – تركيب الثنائي ورمزه

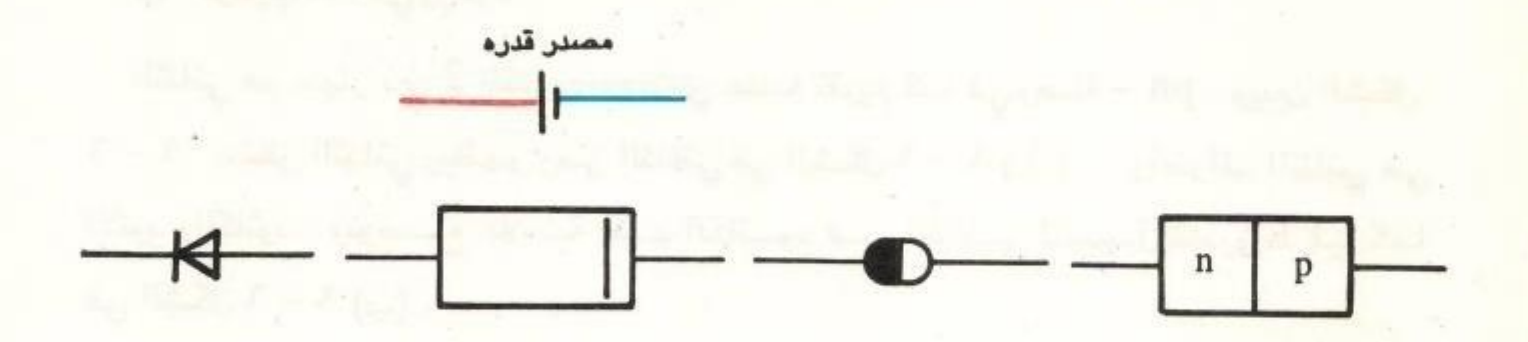
الثنائي هو جهاز ذي 2 إلكترود ، ويؤدي عملية تقويم كما في وصلة – pn . ويبين الشكل ٦ – ٩ منظر الثنائي ويظهر رمـز الثنائي في الشكل ٦ – ٩ (أ) . وأطراف الثنائي هي الأنود والكاثود . وتوضـع علامـة عنـد الكاثـود فـى الثنائـي لتسهـل تمييز طرفيه كما في الشكل ٦ – ٩ (ب) .



الشكل ٦ – ٩ الثنائي

سؤال ٣

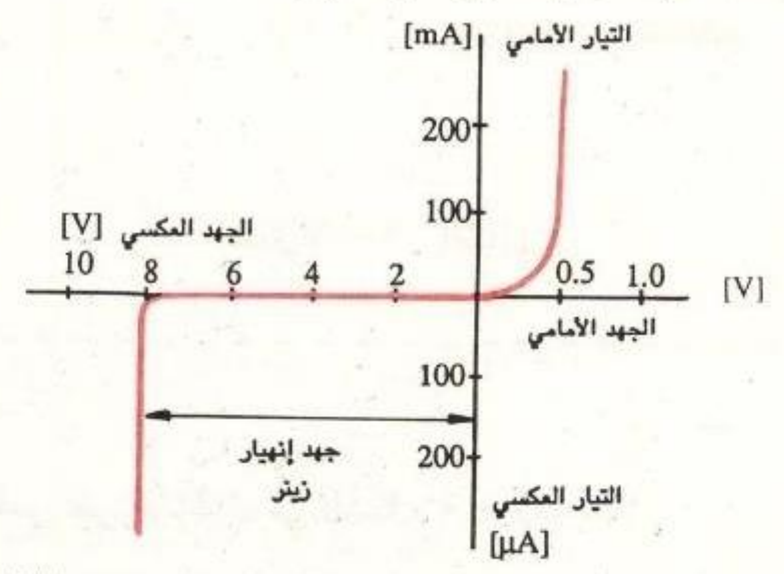
قم بتوصيل جهد أمامي على الثنائيات في الشكل ٦ – ١٠ .



الشكل ٦ - ١٠ ثنائيات

حـ - خواص الثنائي

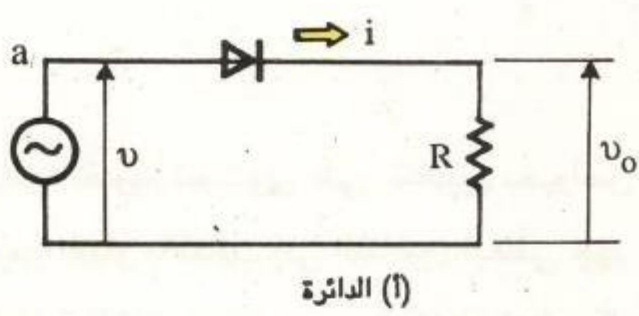
يبين الشكل ٦ - ١١ العلاقة بين الجهد والتيار في الثنائي . ويسمح للتيار بالمرور في الاتجاه الأمامي، ويمنع مروره في الاتجاه العكسى . ومع ذلك فإنه إذا زاد الجهد العكسى على قيمة معينة فإن التيار يمر بصورة مفاجئة ، وتسمى هذه الظاهرة تأثير زينر أو ظاهرة الانهيار ، وتسمى هذه القيمة المعينة للجهد جهد زينر .

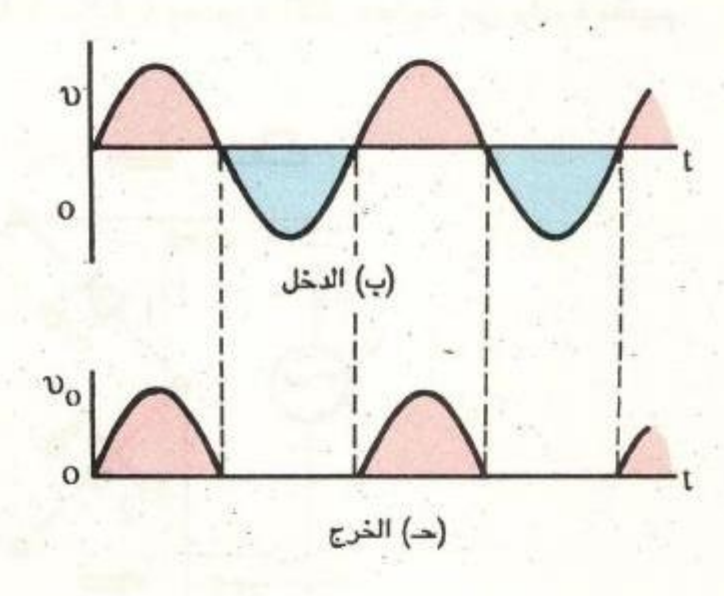


الشكل ٦ - ١١ منحنى علاقة التيار بالجهد في الثنائي

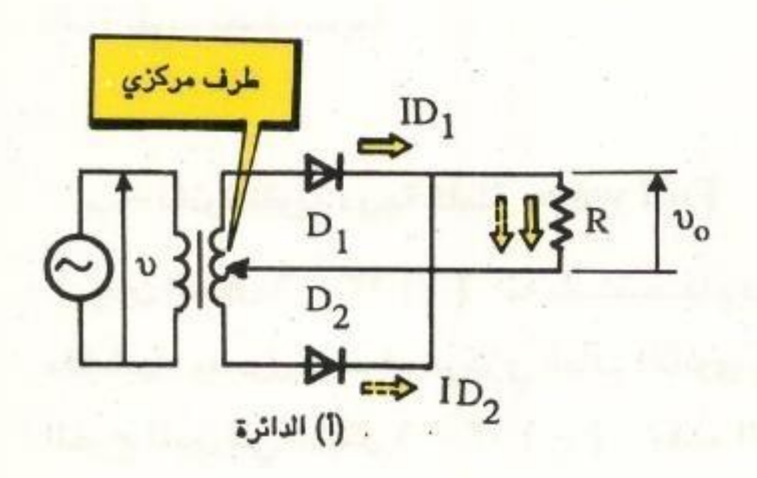
٦ – ١ – ٤ دائرة التقويم Rectifying circuit

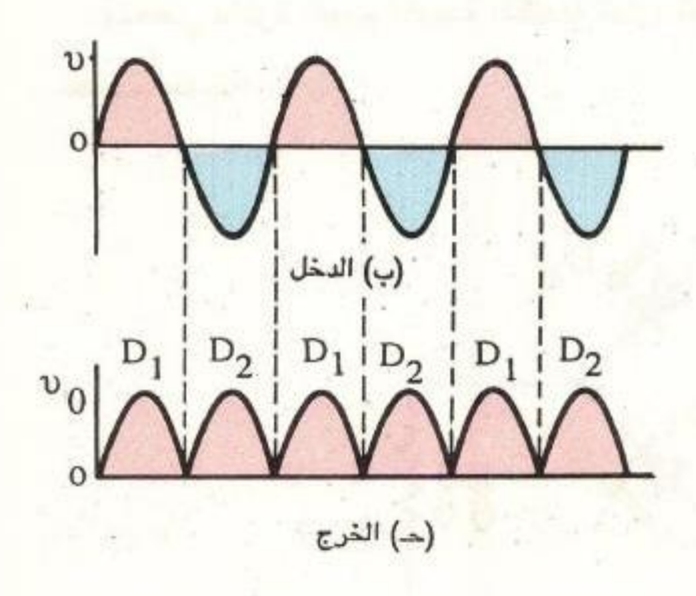
تقوم دوائر التقويم بتحويل التيار المتغير (AC) إلى تيار ثابت (DC) . ويمكن تقسيمها إلى دوائر تقويم نصف موجة ودوائر تقويم موجة كاملة .





الشكل ٦ – ١٢ دائرة تقويم نصف موجة





الشكل ٦ – ١٣ دائرة تقويم موجة كاملة

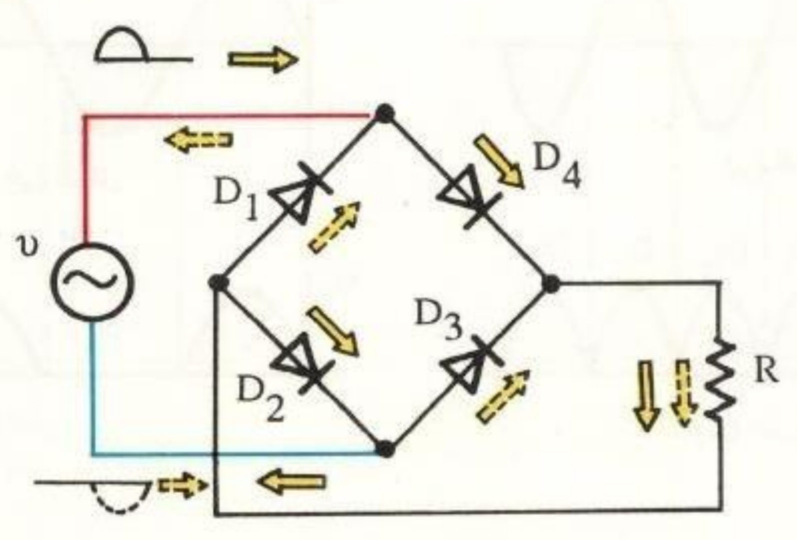
أ – دائرة تقويم نصف موجة Half wave

عند توصيل تيار متغير لدائرة تقويم نصف موجة كالمبينة بالشكل ٦ – ١٢ (أ) نحصل على جهد الخرج المبين في الشكل ٦ – ١٢ (ج) نتيجة للأداء التقويمى للثنائى . ويمر التيار فقط عندما تكون النقطة (a) موجبة لنحصل على نصف الجهد المتغير . وتسمى هذه الدائرة دائرة تقويم نصف موجة .

ب – دائرة تقويم موجة كاملة Full wave

يبين الشكل ٦ – ١٣ (أ) أنه باستخدام دائرة تقويم تحتوى على ثنائيين بخواص متشابهة، ومحول له طرف مركزي للملف الثانوى يمر التيار بالتناوب إلى الثنائيين ليعطى جهد الخرج المبين في الشكل ٦ – ١٣ (ج) . وهذه الدائرة الخاصة بتقويم موجة كاملة تعطي كل جهد الدخل عند الخرج .

وتعطي دائرة تقويم الموجة الكاملة تيارًا ثابتًا (DC) بصورة أكثر فعالية من دائرة تقويم نصف الموجة .



الشكل ٦ – ١٤ دائرة تقويم القنطرة

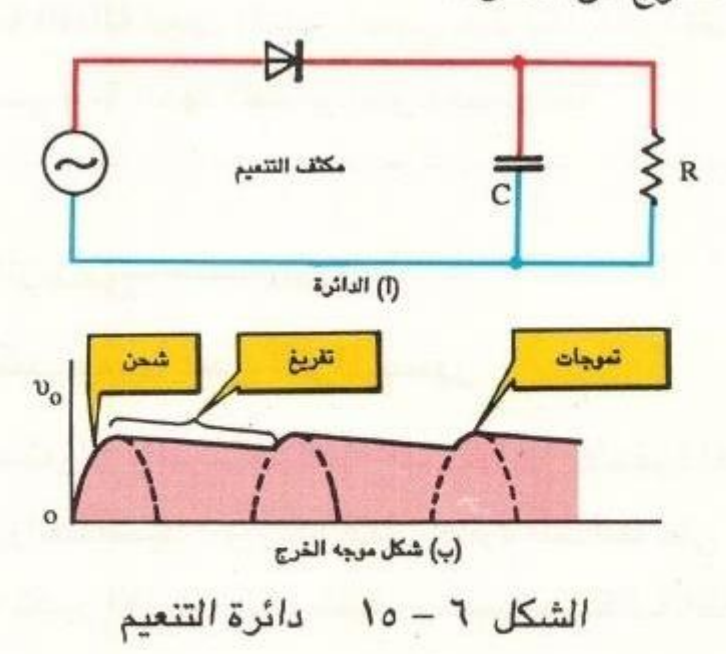
ويبين الشكل ٦ - ١٤ دائرة تقويم موجة كاملة مكونة من 4 ثنائيات ذات خواص متشابهة وتسمى دائرة تقويم "القنطرة" ؛ ولايحتاج هذا النوع من دوائر التقويم المحول ذي الطرف المركزى للملف الثانوي. كما أن الثنائي ذا الجهد العكسى المنخفض مستخدم لأن الجهد العكسي المسلط على الثنائيات في هذه الدائرة انخفض إلى نصف الجهد العكسي على الثنائيات في دائرة الشكل ٦ - ١٣

ويتبين من الشكل ٦ - ١٣ (ب) والشكل ٦ - ١٣ (ج) أن تردد جهد الخرج لدائرة تقويم الموجة الكاملة ضعف تردد جهد الدخل .

جـ - دائرة التنعيم Smoothing circuit

يحتوي جهد خرج دوائر تقويم نصف الموجة، وتقويم الموجه الكاملة على مكونات متغيرة كثيرة . والمكونات المتغيرة التى يحتويها خرج دائرة التقويم تسمى التموجات ، ويمكن تقليل التموجات باستخدام مكثف كما في الشكل ٦ - ١٥ .

ويقوم هذا المكثف بتخزين الشحنة الكهربائية لمنع الهبوط المفاجئ للجهد، ويساعد على الاحتفاظ بأقصى قيمة للخرج من الدخل .



الشكل ٦ - ١٥ دائرة التنعيم

في حالة عدم مرور التيار في الثنائي فإن الشحنة المخزنة في المكثف تفرغ خلال المقاومة R. وكلما زاد الثابت الزمنى RC قلت سرعة انخفاض الجهد . وتتراوح قيمة المكثف C من عدة مئات من الميكروفاراد إلى عدة آلاف ميكروفاراد وهذه الدائرة هى دائرة تنعيم والمكثف هو مكثف التنعيم .

وقيمة سعة مكثف التنعيم في دائرة تقويم الموجة الكاملة يمكن أن تكون نصف قيمة سعة مكثف التنعيم في دائرة تقويم نصف الموجة ؛ لأن تردد التموجات في دائرة تقويم الموجة الكاملة ضعف تردد مصدر القدرة في دائرة تقويم نصف الموجة كما في الشكل ٦ – ١٣

سؤال ٤

إذا كان تردد دخل التقويم 60 هرتز. احسب تردد التموجات في دوائر تقويم نصف الموجة ودوائر تقويم الموجة الكاملة .

سؤال ٥

إذا كانت القيمة الفعالة للجهد المتغير الجيبى عند دخل دائرة تقويم بها دائرة تنعيم هي20 ڤولت . احسب قيمة الجهد المستمر الذى نحصل عليه .

٦ – ٢ الترانزستور Transistor

٦ – ٢ – ١ تركيب ومبدأ عمل الترانزستور

تستخدم الترانزستورات والدوائر المتكاملة المختلفة في الأجهزة الالكترونية مثل أجهزة استقبال التلفزيون والحواسيب . ويرتكز عمل الدائرة المتكاملة على دوائر الترانزستور . وللترانزستور إمكانية تكبير الاشارة الكهربائية ، وتستخدم إمكانية التكبير في دوائر التكبير

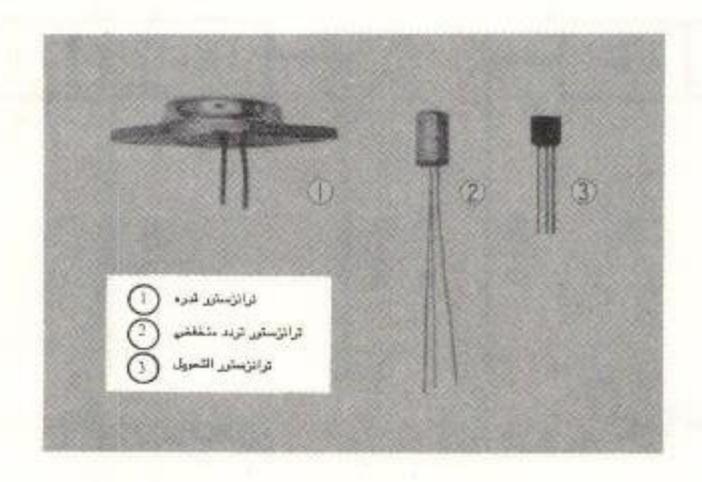
المختلفة ودوائر المذبذبات لتوليد إشارات الموجة الجيبية ودوائر تعديل الموجة الحاملة المستخدمة في الاذاعة والاتصالات .

أ-تركيب الترانزستور

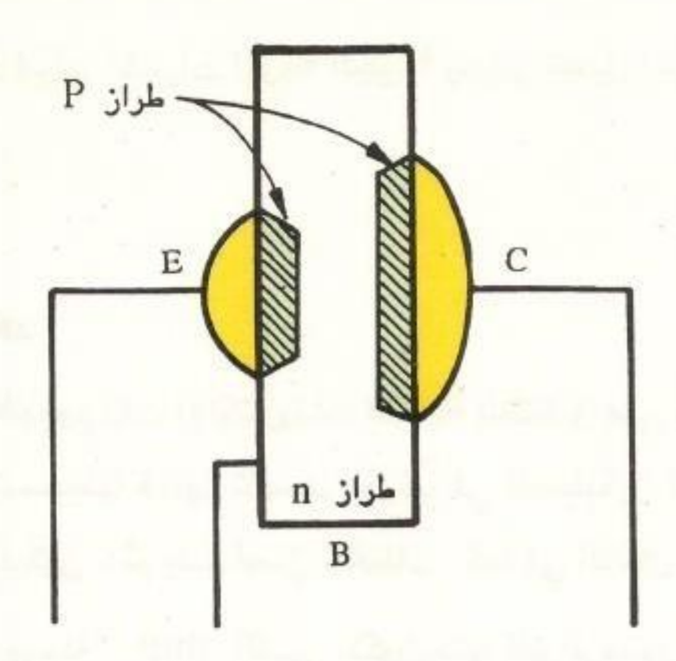
عند وضع شـرائح الأنديوم ذات الإلكتـرونات الثـلاثة للتكافـؤ على جـانبي شـبـه مـوصل السـيليكون نوع – n وتسخينها فإنها تنصـهر جزئيًا في السيليكون لتكون مناطق نوع – p على جانبي شريحة السيليكون . ثم يتـم لصق الأقطاب كما في الشكل ٦ – ١٧ .

هـــذه الطريقة تصنع وصلة – pnp التـى يتكون منها الترانزستور. والأقطاب هى الباعث (E) للإمداد بالحاملات ، والمجمع (C) لاستقبال الحاملات ، والقاعدة (B) للتحكم في الحاملات .

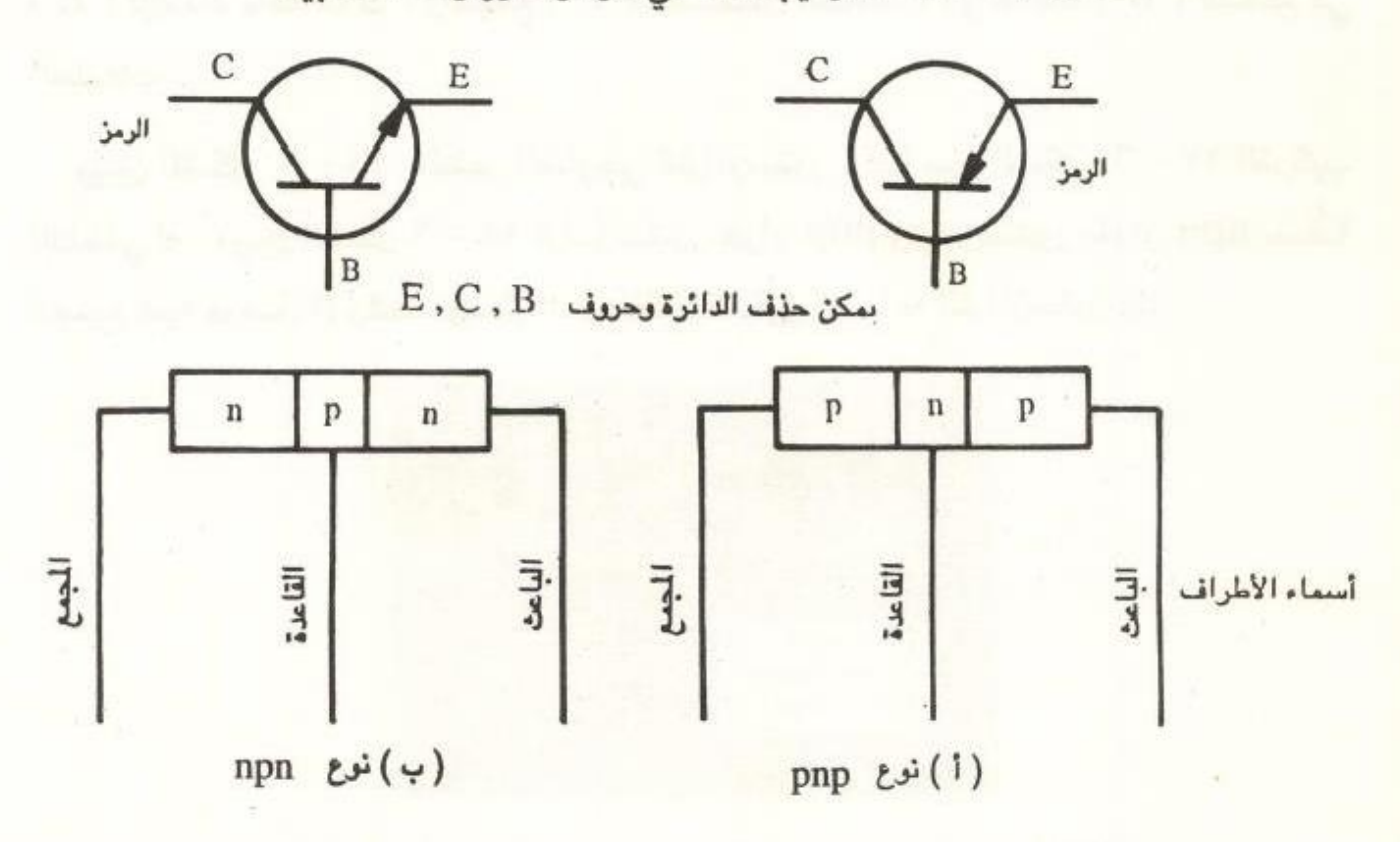
ويبين الشكل ٦ – ١٦ المظهر الخارجي للترانزستور ، كما يبين الشكل ٦ – ١٧ التركيب الداخلي له . ويبين الشكل ٦ – ١٨ ترانزسـتـور طراز pnp وترانزسـتـور طراز npn طبقًـا لتجميع شبه موصل p وشبه موصل n وهناك عدة طرق لصناعه الترانزستورات.



الشكل ٦ – ١٦ المظهر الخارجي للترانزستورات



الشكل ٦ – ١٧ التركيب الداخلي لترانزستور وصلة السبيكة

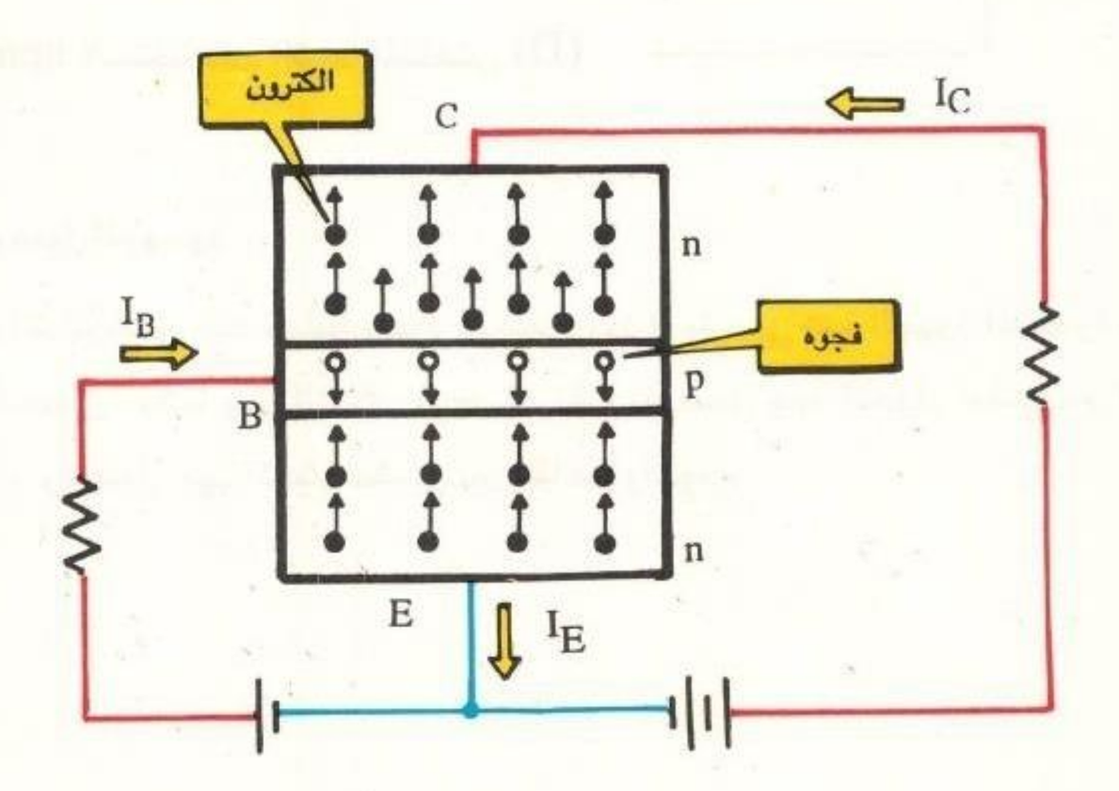


الشكل ٦ – ١٨ رموز الترانزستورات وأسماء أطرافها

ب - مبدأ عمل الترانزستور

في ترانزستور npn المبين في الشكل ٦ - ١٩ نجد أن القطب الباعث هو الطرف المشترك بين دائرتي الدخل والخرج ، ويوجد جهد أمامي بين القاعدة والباعث وجهد عكسي بين القاعدة والمجمع . وفي هذه الحالة تتحرك الإلكترونات (الحاملات الأغلبية) من منطقة الباعث إلى منطقة القاعدة، وبدخول الإلكترونات منطقة القاعدة تتعادل مع الفجوات ، وإذا كانت منطقة القاعدة ضيقة جداً فإن عدداً قليلاً من الإلكترونات تستطيع القاعدة إمساكه أما معظم الالكترونات(99 - 99.5 %) فتصل إلى منطقة المجمع . وبدخول الإلكترونات منطقة المجمع تؤثر عليها قوة نتيجة للجهد الموضوع على المجمع، وتتجمع حول طرف المجمع وينتج عن ذلك تيار المجمع I_C .

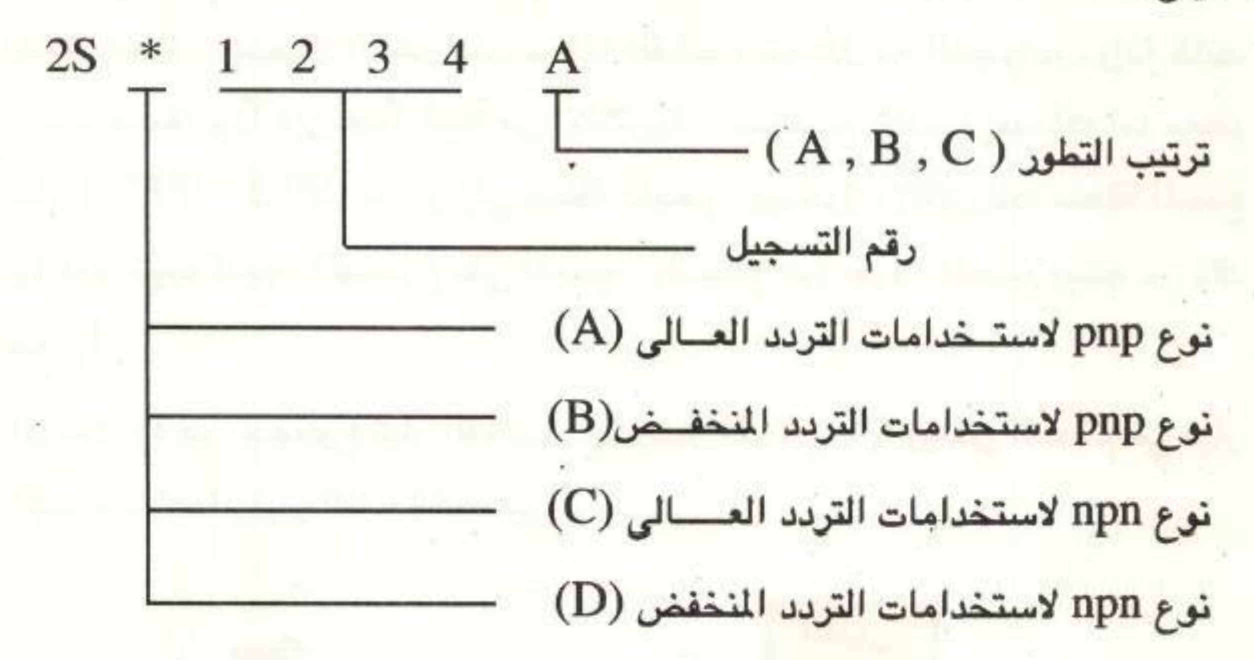
وتيار الباعث I_E هو مجموع تيار القاعدة I_B وتيار المجمع I_C ويمكن التحكم في تيار المجمع الكبير باستخدام تيار القاعدة الصغيرة .



الشكل ٦ - ١٩ مبدأ عمل الترانزستور (قاعدة مشتركة)

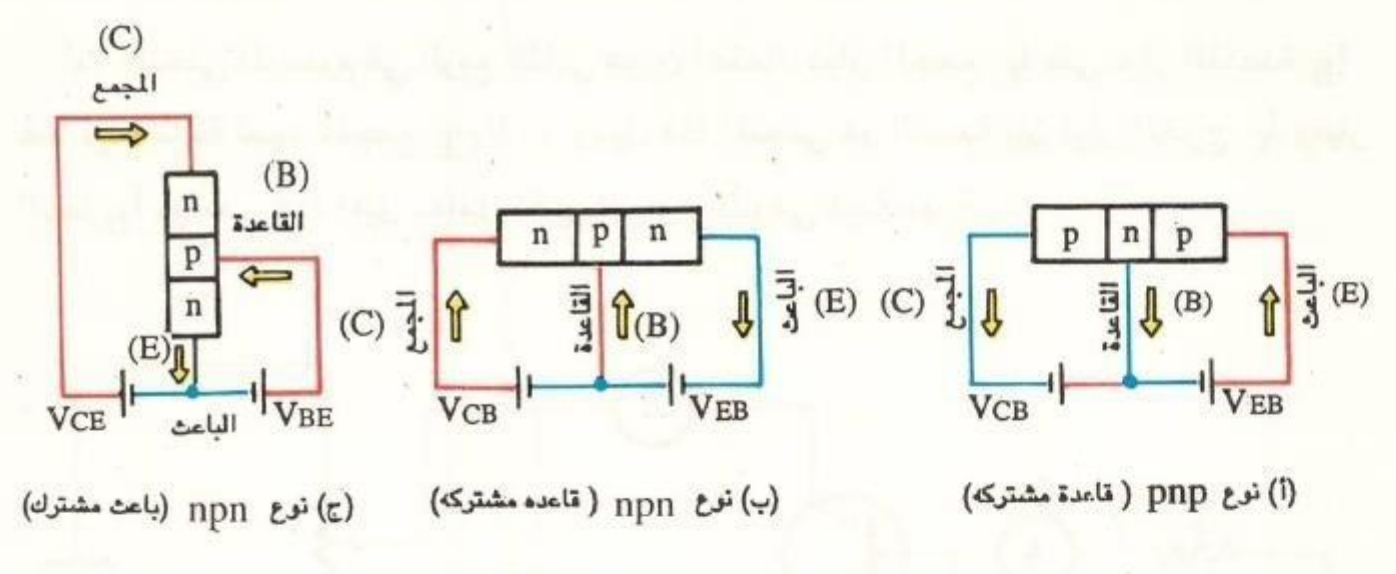
٦ – ٢ – ٢ تسمية وتوصيل الجهود إلى الترانزستور

يمكن تقسيم الترانزستورات إلى : ترانزستورات نوع pnp وترانزستورات نوعnpn وترانزستورات تردد عالٍ وترانزستورات تردد منخفض . وطريقة تسمية الترانزستورات كمايلي:



أ-توصيل الجهود

يعمل الترانزستور عند تسليط جهود مستمرة معينة، وتسمى هذه الجهود المستمرة (DC) جهود الانحياز . وكما يبين الشكل ٦ – ٢٠ نقوم بتوصيل جهد انحياز أمامي بين القاعدة والباعث ، وتوصيل جهد انحياز عكسي بين القاعدة والمجمع .



الشكل ٦ – ٢٠ توصيل جهود الانحياز إلى الترانزستور .

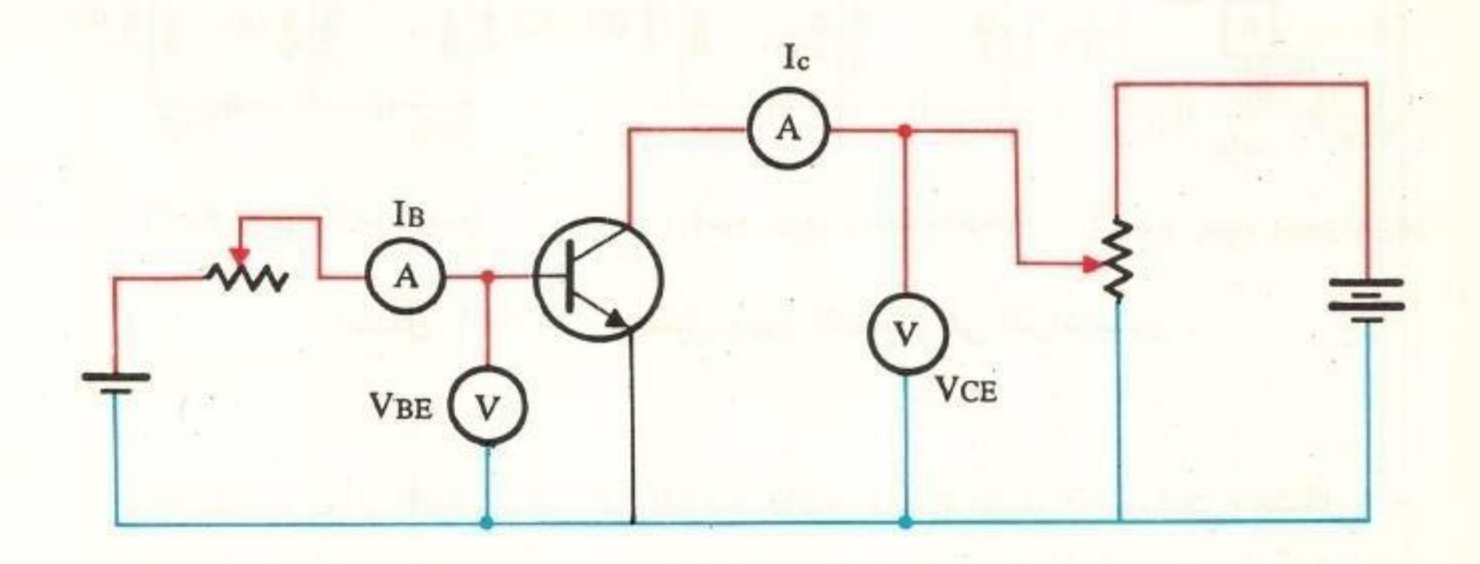
يمكن تقسيم دوائر الترانزستور إلى النوعين الآتيين قاعدة مشتركة كما في «الشكل ٦ – ٢٠ (أ) والشكل ٦ – ٢٠ (ب)» وباعث مشترك « الشكل ٦ – ٢٠ (ج) » وذلك طبقًا للطرف المشترك بين دائرتي الدخل والخرج .

٦ – ٢ –٣ الخواص الاستاتيكية ومعامل h (h parameter)

أ–الخواص الاستاتيكية للترانزستور

يبين الشكل ٦ – ٢٢ المنحنيات التي تعبر عن العلاقة بين الجهود والتيارات في دائرة باعث مشترك موجودة في الشكل ٦ – ٢١ ، وهذه المنحنيات هى الخواص الاستاتيكية لدائرة الباعث المشترك ، والمنحنيات الموجودة في الربع الأول تبين خواص الخرج وهى اعتماد تيار المجمع I_C على جهد المجمع V_{CE} عند قيمة ثابتة لتيار القاعدة I_B . والمنحنى الموجود في الربع الثالث يبين خواص الدخل التي تعبر عن العلاقة بين جهد القاعدة V_{BE} وتيار القاعدة I_B عند ثبات جهد المجمع V_{CE} . وخواص الدخل للترانزستور تشبه خواص الثنائي لأن الخواص بين قاعدة وباعث الترانزستور هى نفسها خواص الثنائي .

أما المنحنى المرسوم في الربع الثانى فيبين اعتماد تيار المجمع I_C على تيار القاعدة I_B عند قيمة ثابتة لجهد المجمع V_{CE} . وميل هذا المنحنى هو النسبة بين تيار الخرج I_C وتيار الدخلI_B ويسمى هذا الميل معامل تكبير التيار h_{fe} وهى قيمة مهمة .



الشكل ٦ – ٢١ دائرة لقياس الخواص الاستاتيكية لترانزستور (باعث مشترك)

والمنحنى المبين في الربع الرابع يبين اعتماد جهد المجمع V_{CE} على جهد القاعدة V_{BE} عند قيمة ثابتة لتيار القاعدة I_B ، ويتم تحليل عملية التكبير باستخدام الخواص الموجودة في الربع الأول وفى الربع الثالث .

ب – معامل h

يمكن معرفة خواص الترانزستور من منحنيات الخواص الاستاتيكية، ولكن يمكن إجراء العمليات الحسابية بسهولة باستخدام معامل h (معامل الهجين).ومعاملات h هى تعبيرات عددية عن الخواص . وباستعراض الخواص المبينة بالشكل ٦ – ٢٢ نجد أن معاملات h

للترانزستور هي h_{oe}, h_{fe} , h_{ie} , h_{re} وهى النسب بين التغيرات في كل خاصية .
واستخدام التغيرات يمكننا من استخدام قيم الخواص التى حصلنا عليها مع الاشارات المتغيرة ذات المدى الصغير ونستخدم Δ لنعبر عن مقدار التغير .

الميل h_{oe} عند قيمة معينة لتيار القاعدة I_B في الربع الأول هى النسبة بين التيار والجهد في دائرة الخرج ، وتسمى سماحية الخرج وهى مقلوب الممانعة ومعادلتها كالآتى :

$$h_{oe} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} \right)_{I_B = \text{ثابت}} \qquad [S]$$

والميل h_{fe} فى الربع الثانى هو معامل تكبير التيار ومعادلته كالآتى :

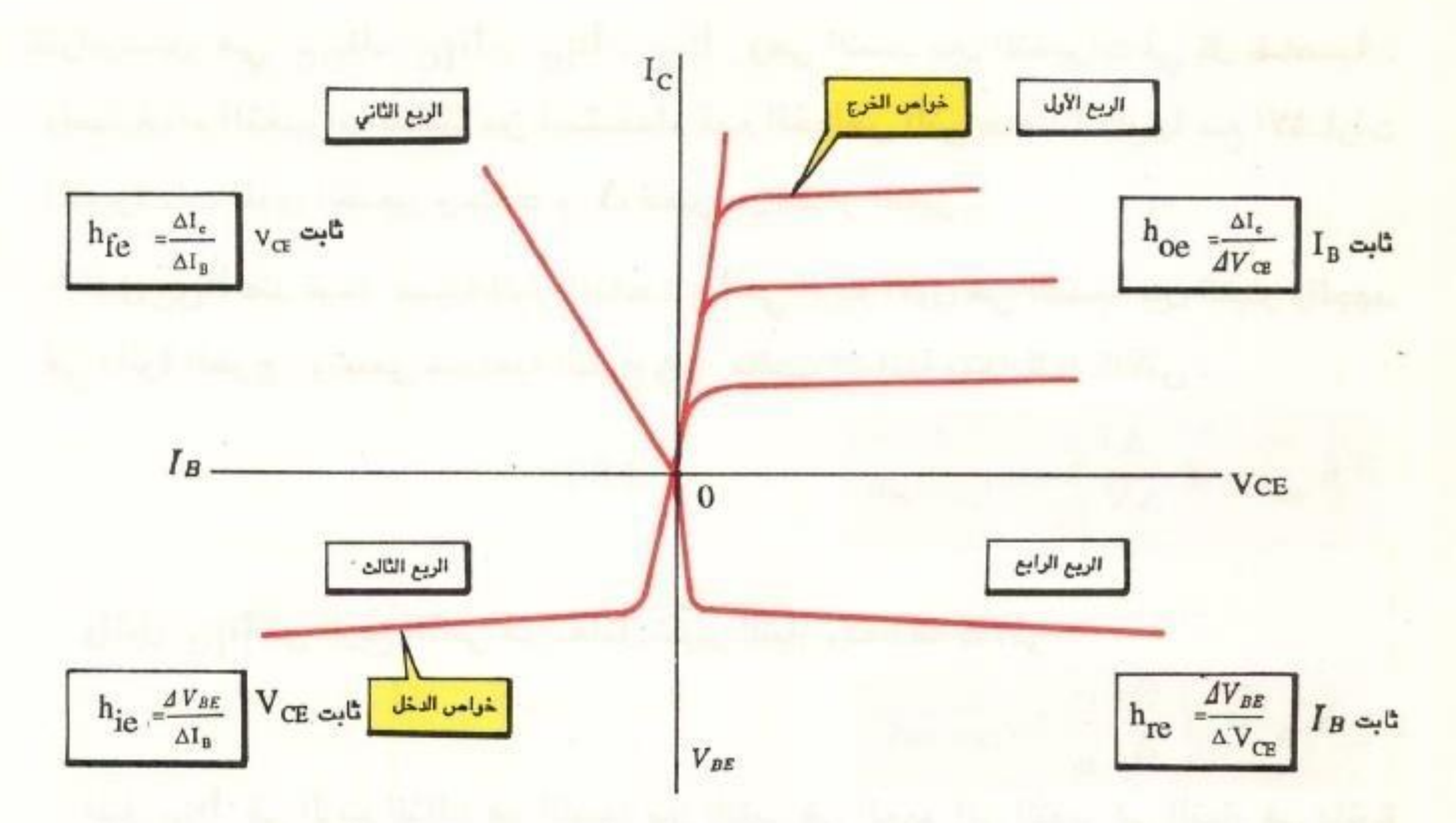
$$h_{fe} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right)_{V_{CE} = \text{ثابت}}$$

الميل h_{ie} فى الربع الثالث هو النسبة بين التغير في الجهد إلى التغير في التيار في دائرة الدخل، ويسمى ممانعة الدخل ومعادلته كالآتى :

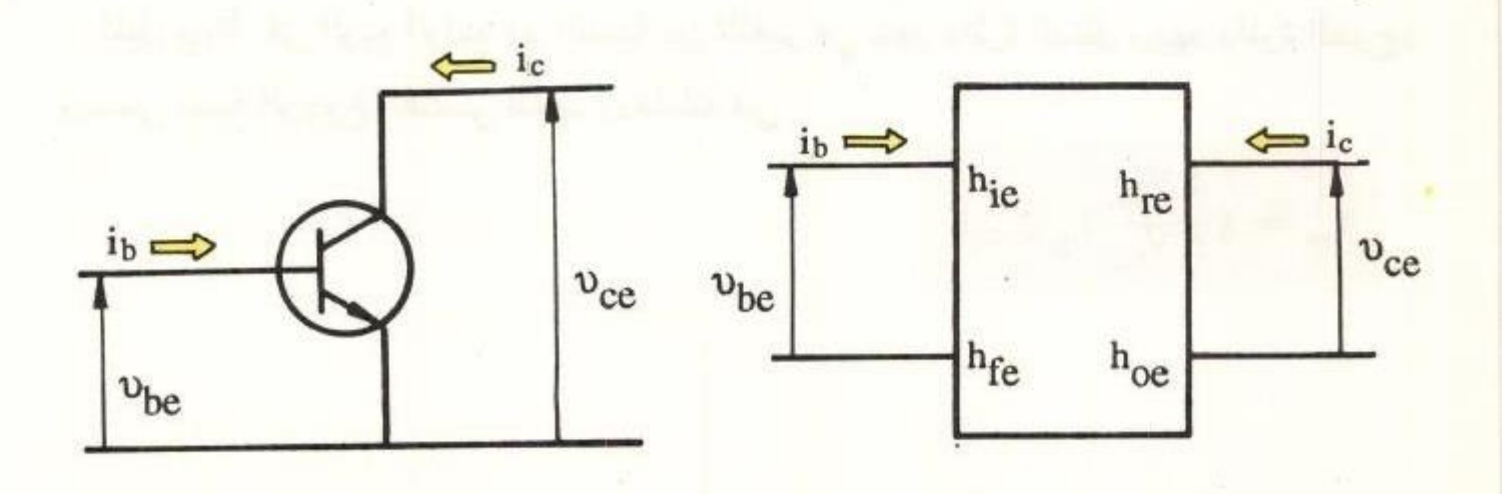
$$h_{ie} = \left(\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} \right)_{V_{CE} = \text{ثابت}} \qquad [\Omega]$$

الميل h_{re} فى الربع الرابع هو النسبة بين التغير في جهد دائرة الدخل وجهد دائرة الخرج، ويسمى نسبة الرجوع العكسي للجهد ومعادلته هى :

$$h_{re} = \left(\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}} \right)_{I_B = \text{ثابت}}$$



الشكل ٦ – ٢٢ منحنيات الخواص الاستاتيكية لترانزستور (باعث مشترك)



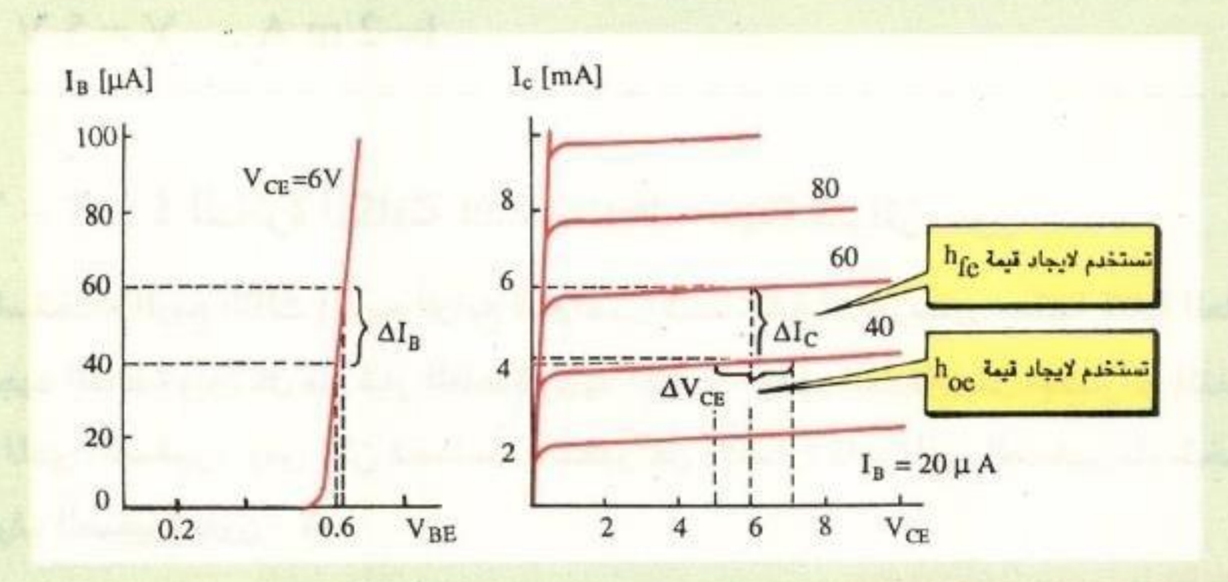
الشكل ٦ – ٢٣ معاملات h للترانزستور

النسبة بين تيار المجمع I_C وتيار القاعدة I_B ($h_{FE} = I_c / I_B$) هي معامل تكبير التيار المستمر (DC) وقيمته تساوي تقريبا قيمة h_{fe} كما في الشكل ٦-٢٢ .

وطبقا للمتغيرات السابق ذكرها يمكننا التعبير عن الترانزستور بمعاملات h داخل صندوق كما في الشكل ٦ – ٢٣ ومعامل h عند وضع (e) في نهايته يعنى باعث مشترك . وفى حالة القاعدة المشتركة نضع (b) عند نهاية المعامل كما في h_{fb} . ويمكن قياس معاملات h بسهولة , وهي تستخدم بكثرة في حسابات دوائر الترانزستور .

مثال١

يبين الشكل ٦ – ٢٤ منحنيات الدخل والخـــرج لترانزستور (باعث مشـــترك) حيث $I_C = 4$ mA, $V_{CE} = 6$V .



الشكل ٦ – ٢٤ منحنيات الدخل والخرج لترانزستور (باعث مشترك)

احسب معاملات h الآتية : h_{oe} , h_{fe} , h_{ie}

الحـــل

$$h_{ie} = \left(\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}\right)_{V_{CE} = 6\,V} = \frac{0.6 - 0.58}{(60 - 40) \times 10^{-6}} = 1000 \quad \Omega$$

$$h_{fe} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right)_{V_{CE} = 6\,V} = \frac{(6 - 4) \times 10^{-3}}{(60 - 40) \times 10^{-6}} = 100$$

$$h_{oe} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}}\right)_{I_B = 40\,\mu A} = \frac{(4.05 - 3.95) \times 10^{-3}}{7 - 5} = 5 \times 10^{-5} \quad S$$

سؤال٦

فى الشـكل ٦ – ٢٤ احسـب معامـلات h الآتيــة h_{oe} , h_{fe} إذا كـــان $I = 2\,mA$, $V = 5\,V$.

٦ – ٢ – ٤ الدائرة المكافئة Equivalent circuit للترانزستور

باستخدام الربع الثالث والربع الرابع للخواص الاستاتيكية للترانزستور يمكننا كتابة العلاقة بين جهد القاعدة وبين كل من تيار القاعدة وجهد المجمع . وهذه العلاقة تمثل الإشارات المتغيرة ذات المدى الصغير، ومن الآن فصاعداً سنعبر عن الإشارة ذات المدى الصغير باستخدام الحروف الصغيرة بدون Δ.

$$\upsilon_{be} = h_{ie}\, i_b + h_{re}\, \upsilon_{ce} \qquad (6-2)$$

وهذه المعادلة قمنا بتمثيلها في الجانب الأيسر من الشكل ٦ – ٢٥، وتبين المعادلة أن v_{be} هو مجموع فرق الجهد $h_{ie}\, i_b$ (الناشئ عن ممانعة الدخل) ومصدر الجهد $h_{re}\upsilon_{ce}$.

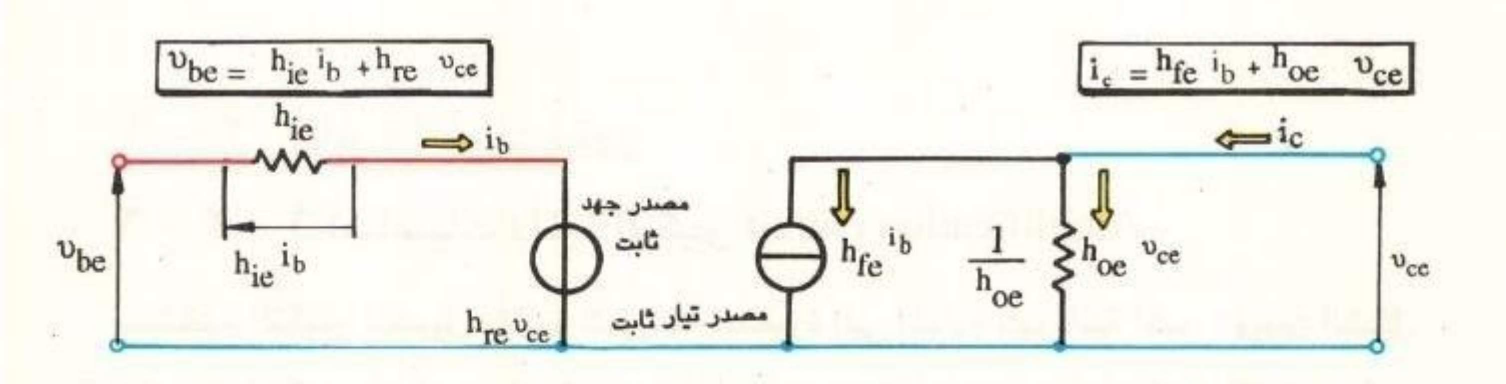
ورمز مصدر الجهد كما في الشكل عبارة عن دائرة بها خط رأسى مع افتراض أن القوة الدافعة الكهربية المتغيرة موجودة عند موقع الرمز .

وباستخدام الربع الأول والربع الثانى للخواص الاستاتيكية للترانزستور يمكننا كتابة العلاقة بين تيار المجمع i_c وبين كل من تيار القاعدة i_b وجهد المجمع v_{ce} . عند وجود إشارة ذات سعة موجة صغيرة فإن تيار المجمع تكون معادلته كالآتى :

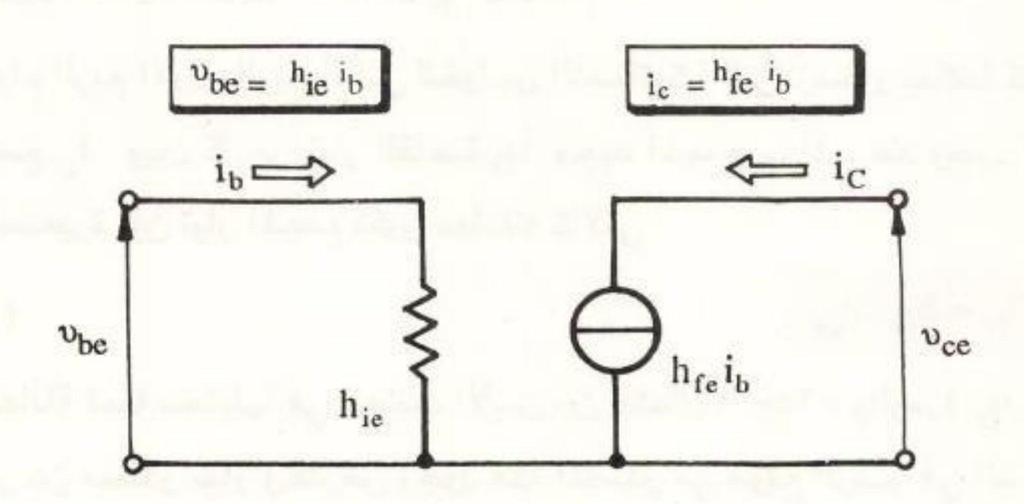
$$i_c = h_{fe}\ i_b + h_{oe}\ v_{ce} \qquad (6-3)$$

وهـذه المعادلة قمنا بتمثيلها في الجانب الأيمن من الشكل ٦ –٢٥ ، والرمز($h_{fe}\ i_b$) فى الشكل يعبر عن مصدر تيار ونفترض وجود هذا المصدر في موقع الرمـز في الشـكل . أما ($h_{oe}\ v_{ce}$) فهو التيار المار خلال سماحية الخرج (h_{oe}) الناتج عن الجهد(v_{ce}) .

وكما يبين الشكل ٦ – ٢٥ فإن الدائرة المكافئة للترانزستور تعبر عن الترانزستور باستخدام مصدر جهد ومصدر تيار وممانعة وسماحية ، وهى تستخدم في تصميم وتحليل دوائر التكبير .



الشكل ٦ – ٢٥ الدائرة المكافئة للترانزستور



الشكل ٦ – ٢٦ الدائرة المكافئة المبسطة

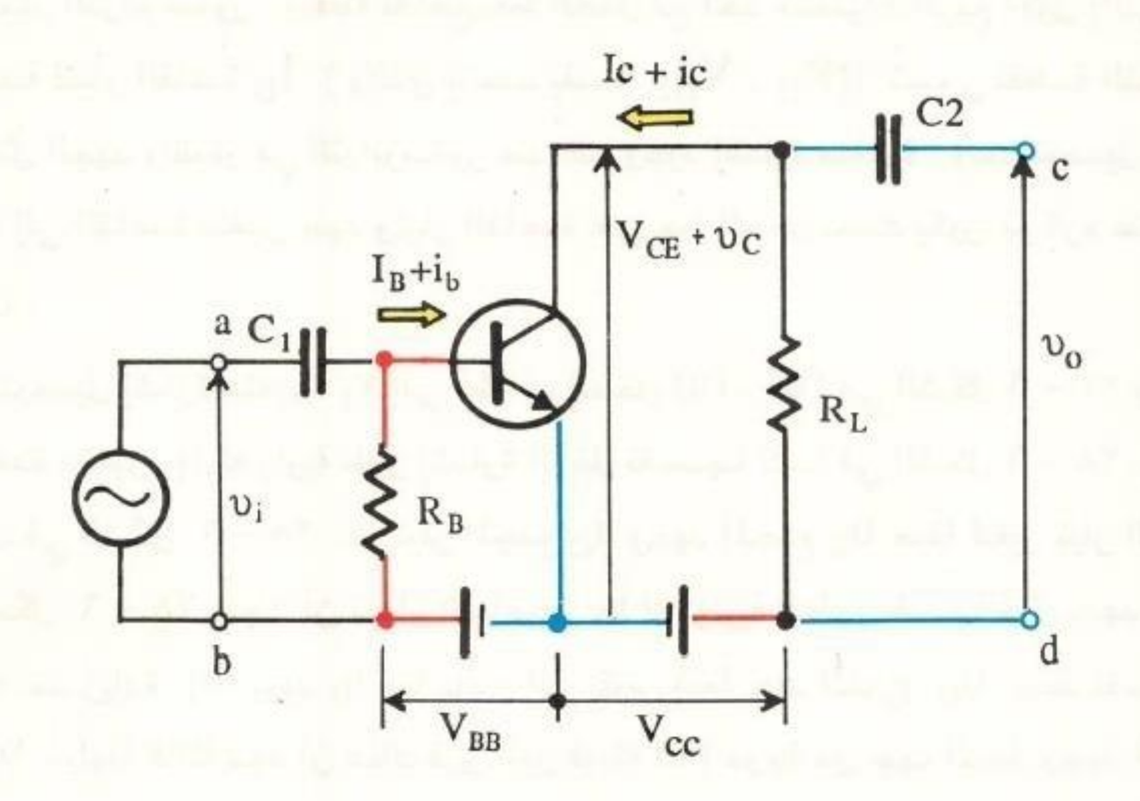
وعمليًا فإن قيم h_{re} ، h_{oe} تهمل عادة لأنها صغيرة ، وعلى هذا تستخدم الدائرة المكافئة المبينة في الشكل ٦ – ٢٦ . وهذه تسمى بالدائرة المكافئة المبسطة .

٦ – ٣ دائرة الترانزستور

٦ – ٣ – ١ أساسيات دائرة التكبير Amplification circuit

يستخدم التكبير لتحويل إشارة كهربائية صغيرة إلى إشارة كهربائية أكبر . ويبين الشكل ٦–٢٧ دائرة تكبير أساسية تستخدم ترانزستور . ويتطلب عمل دائرة تكبير الترانزستور مصدر قدرة مستمر (DC) للقاعدة V_{BB} ومقاومة قاعدة R_B لإمرار تيار القاعدة المناسب I_B بالاضافة إلى مصدر قدرة مستمر (DC) للمجمع V_{CC} ومقاومة حمل R_L لإمرار تيار المجمع المناسب I_C .

والعمل الأساسى لمقاومة الحمل R_L هو الحصول على جهد الخرج المتغير. وتستخدم مكثفات الازدواج C_1 , C_2 لمنع مرور التيار المستمر والسماح بمرور إشارة التيار المتغير فقط



الشكل ٦ – ٢٧ الدائرة الأساسية للمكبر

المعادلات الخاصة بدائرة المجمع هى كالآتى :

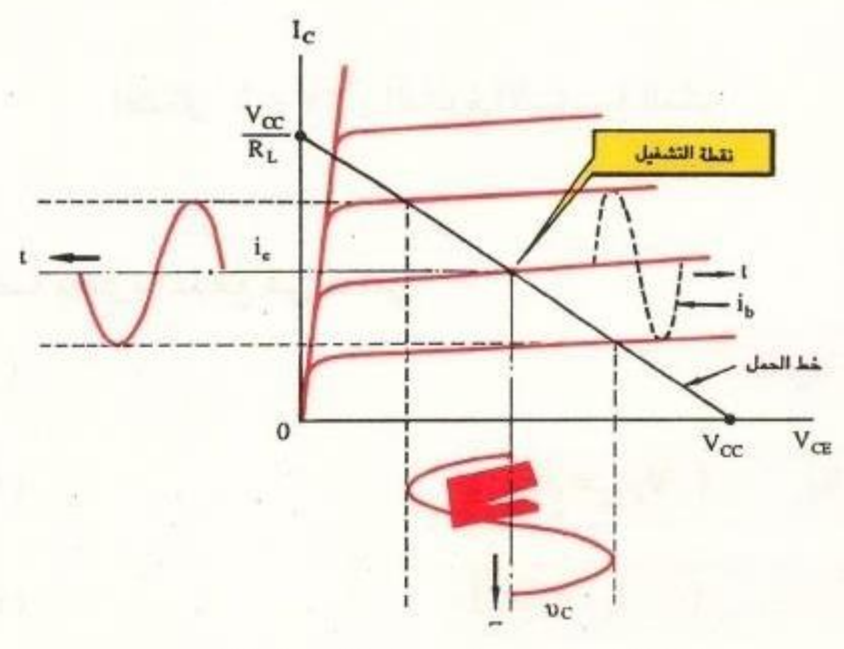
$$V_{CC} = V_{CE} + I_C R_L \qquad (6-4)$$

$$I_C = V_{CC} / R_L \quad (V_{CE} = 0) \qquad (6-5)$$

$$V_{CE} = V_{CC} \quad (I_C = 0) \qquad (6-6)$$

أمــا الشكــل ٦– ٢٨ فيــبين خـط مستقيم يصـل بين نقطتى المعادلتــين (5-6) ،(6-6) على منحنى الخواص الاستاتيكية للترانزستور ، وهذا الخط يسمى «خط الحمل» ويقع عليه جهد وتيار الترانزستور . ونقطة تقاطع خط الحمل مع أحد منحنيات الربع الأول {التى تمثل قيمة معينة لتيار القاعدة I_B (والذى يتحدد بقيمة (R_B , V_{BE})} تسمى نقطــة التشغيل، وهى تمثل الجهد والتيار في الترانزستور عند عدم وجود إشارة متغيرة . وعند توصيل إشارة متغيرة إلى القاعدة يتغير جهد وتيار القاعدة على خط الحمل بحيث يكون مركزه عند نقطة التشغيل .

عند توصيل إشارة متغيرة v_i إلى أطراف الدخل (a) , (b) في الشكل ٦ – ٢٧ يظهــر تيار قاعدة متغير i_b له زاوية طور إشـارة الدخل نفسـهـا كمـا في الشكل ٦ – ٢٨. وتعبـر المنحنيات في الشكل ٦ – ٢٨ عن تيار المجمع i_c وجهد المجمع υ_c طبقًا لتغير تيار القاعدة. وفي الشكل ٦ – ٢٨ نجد أن تـيـار القـاعـدة i_b له زاوية الطور نفسـها مثل جهد الدخل υ_iأى إنه عند زيادة υ_i يزيد i_b مما يؤدى إلى نقص قيمة جهد الخرج υ_o وعند نقص υ_i يزيد υ_o . ولهذا فإننا نجد أن هناك فرق طور قيمته 180 درجة بين جهد الدخل وجهد الخرج



الشكل ٦ – ٢٨ نظرية عمل المكبر

٦ – ٣ – ٢ درجة التكبير والكسب

أ – درجة التكبير Amplification degree

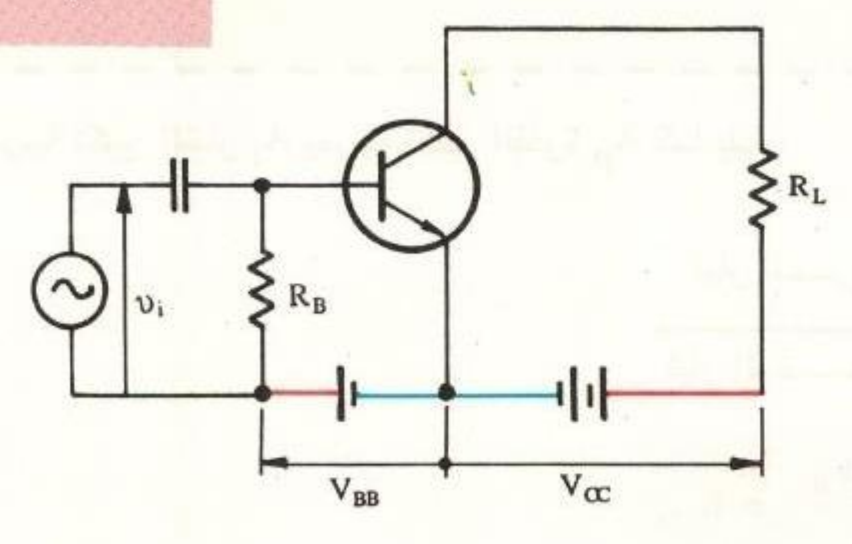
يمكن تحويل دائرة التكبير بالشكل ٦ – ٢٩ إلى الشكل ٦ – ٣٠ باستخدام الدائرة المكافئة المبينة في الشكل ٦ – ٢٦ ، ويمكن إهمال المقاومة R_B لأنها كبيرة جداً بالنسبة إلى h_{ie}. ونفترض أن مفاعلة المكثف C صغيرة بدرجة تكفى لإهمالها عند تردد إشارة الدخل υ_i فإذا افترضنا أن جهود الدخل والخرج هى υ_i , υ_o على الترتيب فإن العلاقات بينها تكون كما يلي :

$$i_b = \frac{\upsilon_i}{h_{ie}} \qquad (6-7)$$

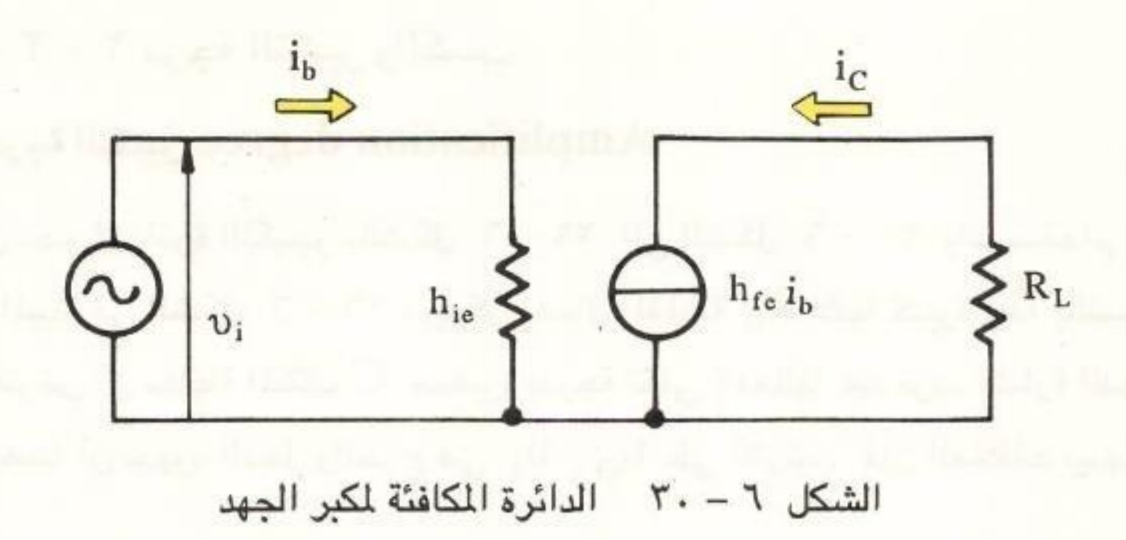
$$\upsilon_o = -i_C R_L = -h_{fe}\, i_b R_L = -h_{fe}\left(\frac{\upsilon_i}{h_{ie}}\right) R_L \qquad (6-8)$$

وفى المعادلة (8 – 6) توجد إشارة سالب لوجود فرق طور 180 درجة بين جهد الخرج وجهد الدخل . ونسبة جهد الخرج إلى جهد الدخل تسمى درجة التكبير . ومن المعادلة نفسها يمكن استنتاج درجة تكبير الجهد في المعادلة التالية :

$$A_V = \frac{\upsilon_o}{\upsilon_i} = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_L \qquad (6-9)$$



الشكل ٦ – ٢٩ دائرة تكبير جهد



الشكل ٦ – ٣٠   الدائرة المكافئة لمكبر الجهد

مثال٢

احسب درجة تكبير الجهد للدائرة بالشكل ٦ – ٢٩ . حيث معاملات h هى

$h_{fe} = 200$, $h_{ie} = 4\ k\,\Omega$ ومقاومة الحمل هى $R_L = 6\ k\,\Omega$

الحـــل

بتعويض القيم السابقة في المعادلة (9 – 6) نحصل على القيمة الآتية :

$$A_\upsilon = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} \times R_L = \frac{200}{4000} \times 6000 = 300$$

ويمكن حساب درجة تكبير التيار A_i ودرجة تكبير القدرة A_p كما يلى :

$$A_i = \frac{\text{تيار الخــرج}}{\text{تيار الدخـــل}}$$

$$A_i = \frac{h_{fe}\ i_b}{i_b} = h_{fe} \qquad (6 - 10)$$

$$Ap = \frac{\text{قدرة الخــرج}}{\text{قدرة الدخـــل}}$$

$$A_p = \frac{\upsilon_o i_c}{\upsilon_i i_b} = \frac{h_{fe}^2}{h_{ie}} R_L \qquad (6-11)$$

ب – الكسب Gain

عند حساب درجة التكبير نجد أنها تكون عددًا كبيرًا . وبدلاً من هذا العدد الكبير نستخدم لوغاريتم هذا العدد مضروبا في 10 أو في 20 . وهذه القيمة تسمى الكسب G ووحدة قياسها الديسيبل ويرمز لها بالرمز (d B)* . وتستخدم المعادلات الآتية لحساب كسب الجهد، وكسب التيار، وكسب القدرة :

كسب الجهد $G_v = 20 \log_{10} A_V$ [d B] (6 - 12)

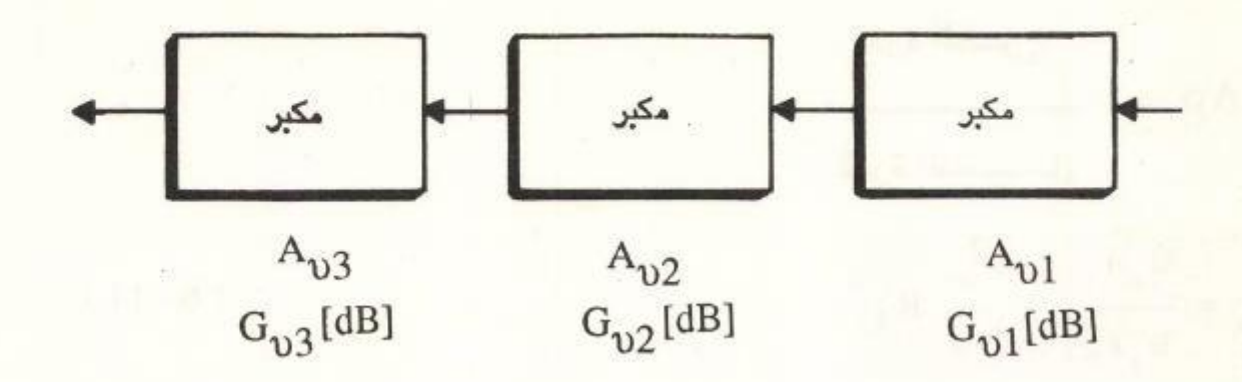
كسب التيار $G_i = 20 \log_{10} A_i$ [d B'] (6 - 13)

كسب القدرة $G_p = 10 \log_{10} A_p$ [d B] (6 - 14)

حـ – درجة التكبير والكسب في المكبر متعدد المراحل

Multi-stage amplification circuit

يبين الشكل ٦ – ٣١ توصيل عدد من مراحل التكبير معًا للحصول على درجة التكبير المطلوبة . وفى هذا التوصيل تكون درجة التكبير الكلية للجهد هى حاصل ضرب درجة تكبير كل مرحلة .



الشكل ٦ – ٣١ المكبر متعدد المراحل

الكسب الكلى للجهد هو مجموع كسب جهد كل مرحلة . وتحسب درجة تكبير التيار والقدرة والكسب بالطريقة نفسها. ومن الشكل ٦ – ٣١ نجد أن المعادلات الخاصة بدرجة التكبير الكلية للجهد A_{VO} والكسب الكلى للجهد G_{VO} هى كالآتي :

$$A_{vo} = A_{v1} \cdot A_{v2} \cdot A_{v3} \qquad (6-15)$$

$$G_{vo} = 20 \, Log_{10} (A_{v1} \cdot A_{v2} \cdot A_{v3}) = 20 \, Log_{10} A_{v1} + 20 \, Log_{10} A_{v2} + 20 \, Log_{10} A_{v3}$$

$$= G_{v1} + G_{v2} + G_{v3} \quad (dB) \qquad (6-16)$$

سؤال ٧

في الدائرة المبينة بالشكل ٦ – ٢٩ ذات المعاملات الآتية :

$$h_{fe} = 150 \;, \quad h_{ie} = 3 \, k\,\Omega \;, \quad R = 5 \, k\,\Omega$$

احسب درجة تكبير الجهد A_v وكسب الجهد G_v

* فى كسب الجهد مثلاً بعد حساب لوغاريتم نسبة جهد الخرج إلى جهد الدخل تكون وحدة قياس هذه الكمية هى (dB) . وتستخدم هذه الطريقة أيضًا عند حساب الضغط الصوتى وخرج الصوت باستعمال لوغاريتم نسبة المستوى إلى قيمة قياسية .

٦ - ٣ - ٣ دائرة التكبير ذات التغذية الراجعة للتيار

Current Feedback

تحتاج الدائرة الأساسية للترانزستور إلى مصدري قدرة مستمر (DC) ويعدّ ذلك غير ملائم للاستخدام العملى في الأدوات الالكترونية . ويبين الشكل ٦ - ٣٢ دائرة تستخدم مصدر قدرة مفرد . وفى الدائرة المبينة بالشكل ٦-٢٩ عند ارتفاع درجة الحرارة يزيد تيار المجمع فتحدث سخونة شديدة للترانزستور وقد يحدث انهيار للترانزستور ، وتسمى هذه الظاهرة الهروب الحرارى . والدائرة المبينة في الشكل ٦-٣٢ تعطى تكبيرًا ثابتًا حتى مع ارتفاع درجة الحرارة ، وهـذه الدائرة تسمى المكبر ذا التغذية الراجعة للتيار . والوظائف التي يؤديها كل من المقاومات والمكثفات بدائرة الشكل ٦ - ٣٢ نشرحها كما يلي :

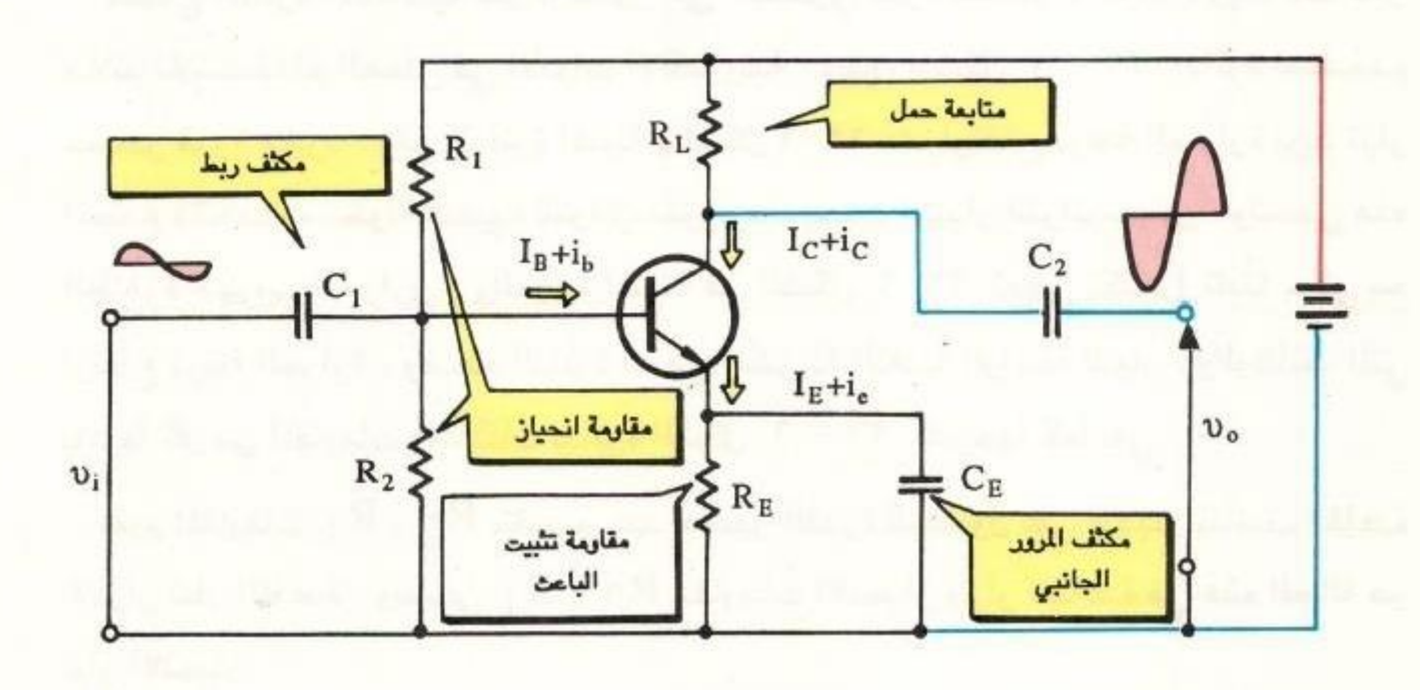
تقوم المقاومات R_1 , R_2 بتقسيم جهد مصدر القدرة للحصول على الجهد المناسب للقاعدة لامرار تيار القاعدة . وتسمى R_1 , R_2 مقاومات الانحياز وتيار القاعدة في هذه الحالة هو تيار الانحياز .

تمنع المقاومة R_E زيادة تيار المجمع عند ارتفاع درجة الحرارة المحيطة ، وتسمى المقاومة R_E مقاومة الباعث التثبيتية . وعند ارتفاع درجة الحرارة يزداد تيار المجمع في الترانزستور وتؤدى هذه الزيادة إلى زيادة تيار الباعث وزيادة الجهد على المقاومة R_E، وتكون النتيجة نقص الجهد بين القاعدة والباعث مما يؤدي إلى إنقاص تيار المجمع ، وفى آخر الأمر نجد أن تيار المجمع لايزيد حتى عند إرتفاع درجة الحرارة المحيطة .

أما المكثفات C_1,C_2 فتسمى مكثفات الإزدواج ، وتمنع مرور التيار المستمر (DC) وتسمح بمرور التيار المتغير، وتستخدم للازدواج بين الدوائر .

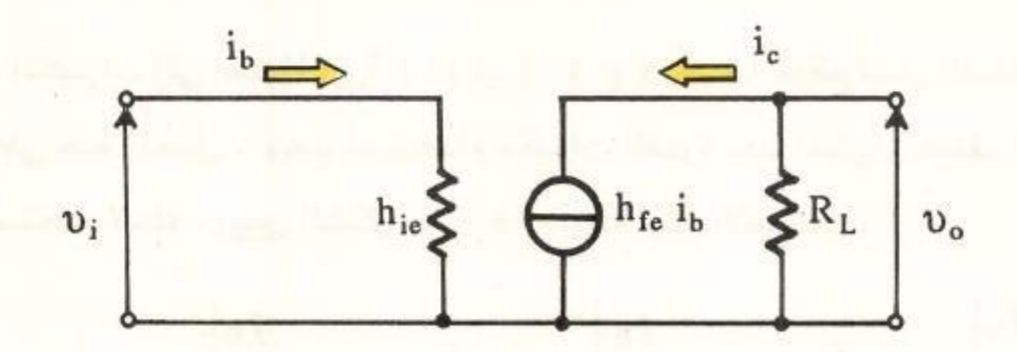
المكثف C_E يسمى مكثف المرور الجانبي ، ويسمح للإشارة المتغيرة بالمرور خلاله حتى لايقل تيار الاشارة المتغيرة نتيجة مروره فى المقاومة R_E .

والمقاومة R_L هى مقاومة الحمل، ويظهر عليها جهد الخرج . وعند الترددات المنخفضة تزيد مفاعلات المكثفات مما يؤدى إلى تدهور أداء مكثفات الازدواج والمرور الجانبى ، وذلك يؤدى إلى نقص درجة التكبير عند الترددات المنخفضة . وإذا أردنا تحسين الخواص عند الترددات المنخفضة يجب استخدام مكثف ذي سعة كبيرة .



الشكل ٦ – ٣٢ المكبر ذو التغذية الراجعة للتيار

ويبين الشكل ٦ – ٣٣ الدائرة المكافئة لدائرة الشكل ٦ – ٣٢ فيما يتعلق بالاشارة المتغيرة . ويمكن إهمال المقاومتين R_2 , R_1 لأن قيمها كبيرة على وجه العموم (عدة عشرات من الكليو أوم) بالنسبة إلى قيمة h_{ie} (عدد من الكيلو أوم) .

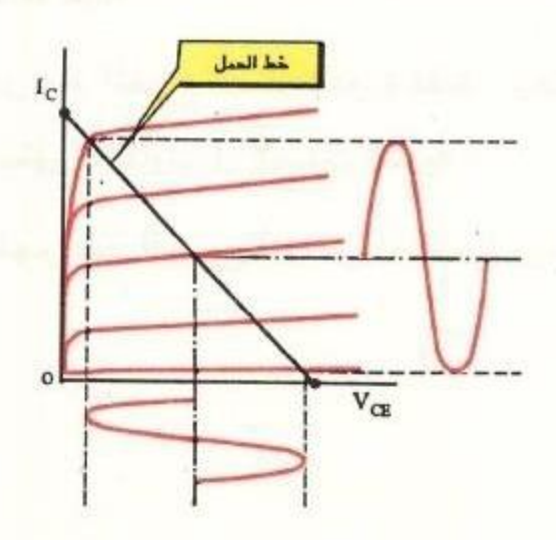


الشكل ٦ – ٣٣ الدائرة المكافئة لدائرة الشكل ٦ – ٣٢

ويمكن حذف كل من C_2 , C_1 لأن مفاعلاتها صغيرة في الحيز الترددى المستخدم . والمقاومة R_E يوجد عليها قصر ناتج من المفاعلة الصغيرة للمكثف C_E.

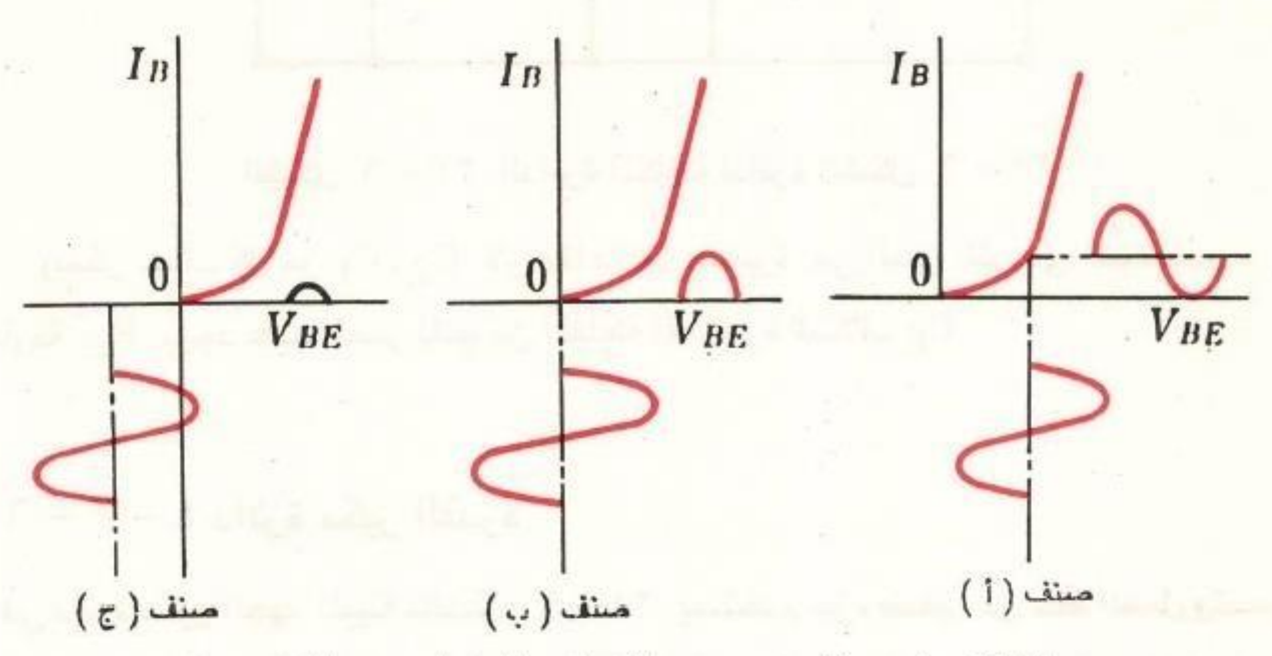
٦ – ٣ – ٤ دائرة مكبر القدرة

في دائرة مكبر الجهد المبينة بالشكل ٦ – ٢٨ يستخدم جزء صغير من خط الحمل وتسمى الدائرة دائرة تكبير الإشارات ذات المدى الصغير . وعلى العكس من ذلك في دائرة مكبر القدرة بالشكل ٦ – ٣٤ فيستخدم تقريبا كل اجزاء خط الحمل ، وتسمى الدائرة دائرة تكبير الاشارات ذات المدى الكبير ، وتستخدم دائرة مكبر القدرة لتغذية الهوائيات (التى تشع الموجات الكهرومغناطيسية) بالقدرة عالية التردد، وتستخدم أيضًا لتغذية دوائر المحركات .



الشكل ٦ – ٣٤ الإشارات في دائرة مكبر القدرة

تصنف المكبـرات إلى أصناف (أ) ، (ب) ، (ج) طبـقًا لموقع تيـار القـاعـدة أو نقطة التشغيل على خط الحمل . وعند استـخدام مكبرات القدرة يعدّ اختيـار صنف المكبر مـهما للغرض المستخدم لأجله . ويبين الشكل ٦ - ٣٥ أمثلة لهذه الأصناف .

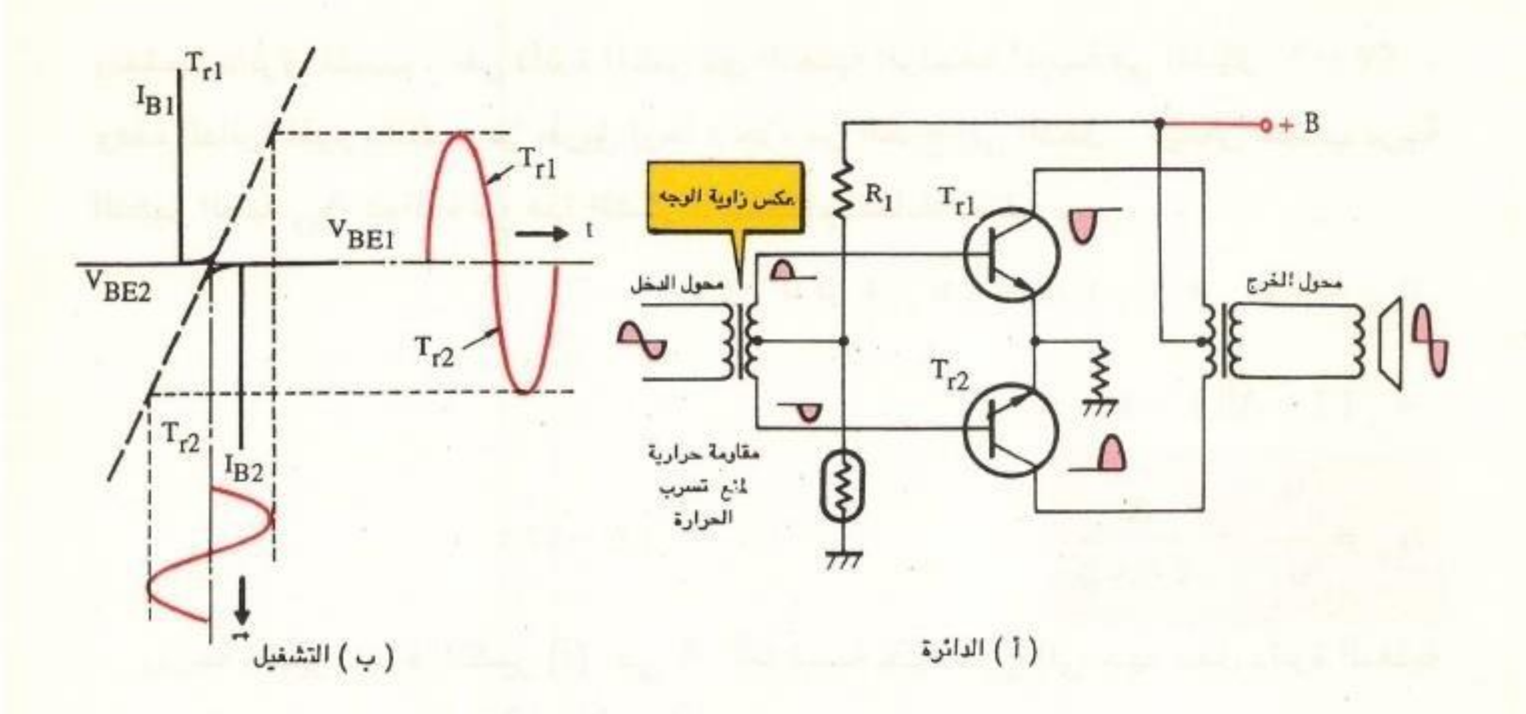


الشكل ٦ - ٣٥ تصنيف المكبرات طبقا لموقع نقطة التشغيل

في الصنف (أ) لايحدث أي تشويه أو انحراف ، ويمر التيار حتى في حالة عدم وجود أية إشارة وذلك يؤدى إلى كفاءة قليلة .

وفي الصنف (ب) يظهر عند الخرج نصف الدورة فقط ، وعند استـخدام مكبر الجـذب والدفع (حيث يعمل 2 ترانزستور بالتناوب) لايحدث تشويه .

وفي الصنف (ج) يظهـر عند الخـرج أقل من نصف الدورة ، ويسـتـخـدم هذا النوع للدوائر النبضية .



الشكل ٦ – ٣٦ مكبر الجذب والدفع صنف (ب)

ويبين الشكل ٦ – ٣٦ مثالاً لدائرة مكبر الجذب والدفع صنف (ب) المستخدم في جهاز استقبال الإذاعة . وفى الدائرة المبينة بهذا الشكل نحتاج لدائرة عكس زاوية طور إشارة الدخل (بواسطة محول الدخل) لتمكين 2 ترانزستور من العمل بالتناوب . ويرمز لمصدر القدرة المستمر (DC) اللازم لتشغيل الترانزستور بالرمز (B +)، وعادة لايظهر مصدر القدرة في الأشكال التي تبين مبدأ ونظرية عمل الدوائر .

٦ – ٣ – ٥ دائرة المذبذب Oscillation circuit

أ – دائرة التكبير ذات التغذية الراجعة ومبدأ عمل التذبذب

الدائرة التى تقوم بتوليد إشارة التردد العالى لاستخدامها في الاتصال اللاسلكى وقياس وضبط اشارة التيار المتردد تسمى دائرة المذبذب . وتستخدم في عدد من الأدوات الإلكترونية.

وتعتمد دائرة المذبذب . على دائرة المكبر ذى التغذية الراجعة المبينة في الشكل ٦ – ٣٧ . وهذه الدائرة تقوم بالتكبير عن طريق إرجاع جزء من الخرج إلى الدخل . ويمكن حساب درجة التكبير الكلية A_o للدائرة في هذا الشكل باستخدام المعادلة التالية :

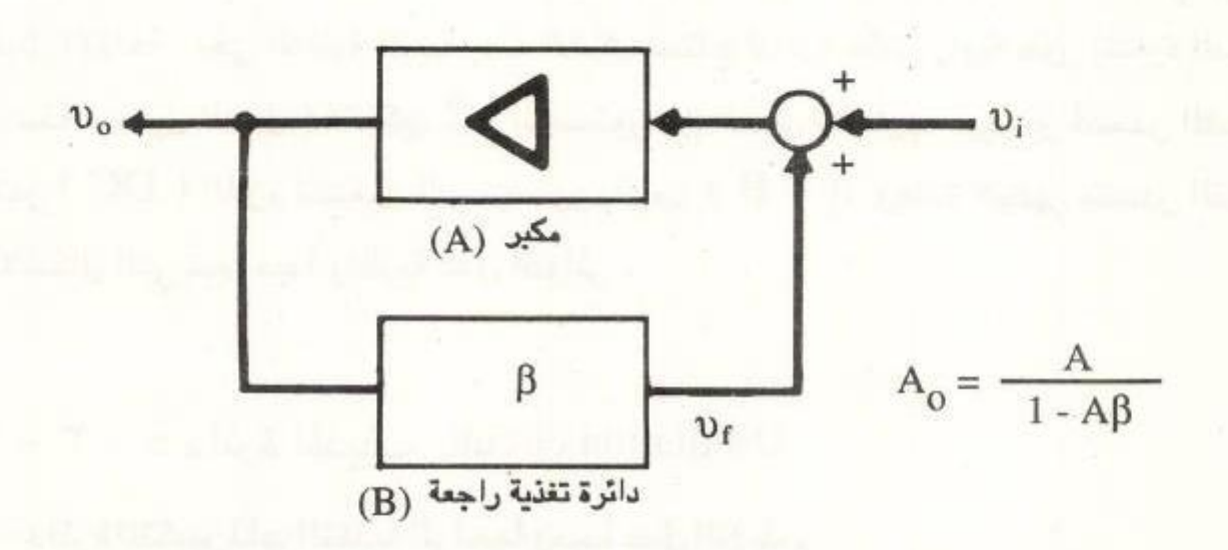
$$\upsilon_o = (\upsilon_i + \upsilon_f)\, A = (\upsilon_i + \beta \upsilon_o)\, A$$

$$\upsilon_o (1 - A\beta) = \upsilon_i\, A$$

$$A_o = \frac{\upsilon_o}{\upsilon_i} = \frac{A}{1 - A\beta} \qquad (6-17)$$

ودرجة تكبير دائرة التكبير (أ) هى A أما نسبة جهد خرج إلى جهد دخل دائرة التغذية الراجعة (ب) فهـــى $(\beta = V_f / V_o)$.

كسب العروة هو $(A\beta)$ وكمية التغذية الراجعة هى $(1 - A\beta)$.



الشكل ٦ – ٣٧ مكبر ذو تغذية راجعة

في المعادلة (17 - 6) عند $(A\beta = 1)$ نجد أن درجة التكبير الكلية تصبح مالانهــايـــة $(A_0 = \infty)$ ويمثل ذلك حالة التذبذب حيث يتم الحصول على إشارة لها تردد ذبذبة يتحدد من الشرط $(A\beta = 1)$ حتى بدون وجود إشارة دخل ويسمى الشرط $(A\ \beta = 1)$ شرط التذبذب .

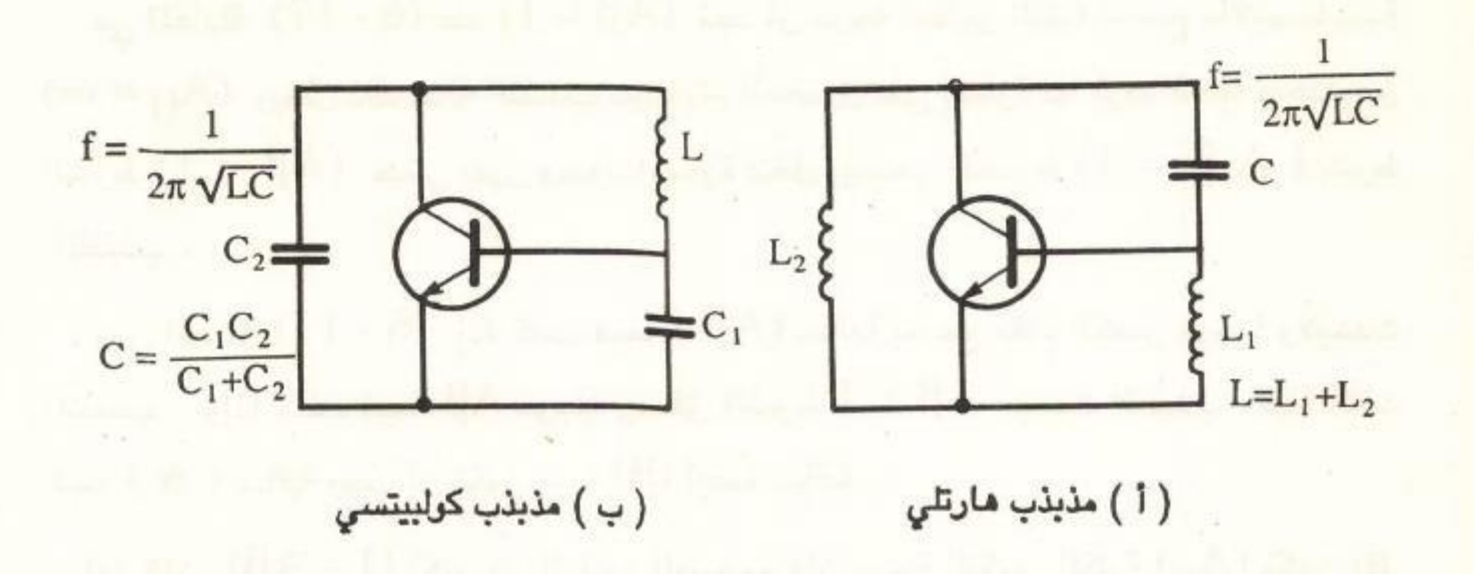
ومن المعادلة (17 - 6) إذا كانت قيمة $(A\beta)$ سالبة يصبح مقام الكسر موجبا ولايحدث التذبذب . وإذا كانت قيمة $A\beta$ موجبة وتحقق الشرط $A\beta = 1$ يحدث التذبذب . فإذا كانت قيمة (A) سالبة وجب أن تكون قيمة (β) أيضاً سالبة .

إذا كان $(1 - A\beta)$ أكبر من الواحد الصحيح فإن درجة التكبير الكلية (A_0) تكون أقل من درجة التكبير الأصلية (A) ، وتكون الدائرة في هذه الحالة دائرة مكبر ذي تغذية راجعة سالبة . وتستخدم دائرة التغذية الراجعة السالبة كثيراً نظراً لما لها من خواص ترددية محسنة وخواص ضوضاء وتشويه محسنة على الرغم من نقص درجة التكبير .

وعندما يكون $(1 - A\beta)$ أقل من الواحد الصحيح فإن درجة التكبير الكلية A_0 تكون أكبر من درجة التكبير الأصلية A . وتكون الدائرة في هذه الحالة دائرة مكبر ذى تغذية راجعة موجبة . وفى دائرة المذبذب بمجرد تشغيل المفتاح تظهر ذبذبة غير عادية ويحدث لها تكبير ذو تغذية راجعة موجبة ، وبعد مضي وقت قصير تصل الدائرة إلى شرط التذبذب وتكون إشارة الخرج ثابتة .

ب- دائرة مذبذب L C

تحتوى دائرة مذبذب LC على ملف L ومكثف C لتحقيق شرط التذبذب $(A\beta = 1)$. ويبين الشكل ٦ – ٣٨ دوائر مذبذب LC الأساسية وقيمة تردد الذبذبة (f) . وبتغير قيم L , C يمكن الحصول على قيمة التردد المطلوبة .

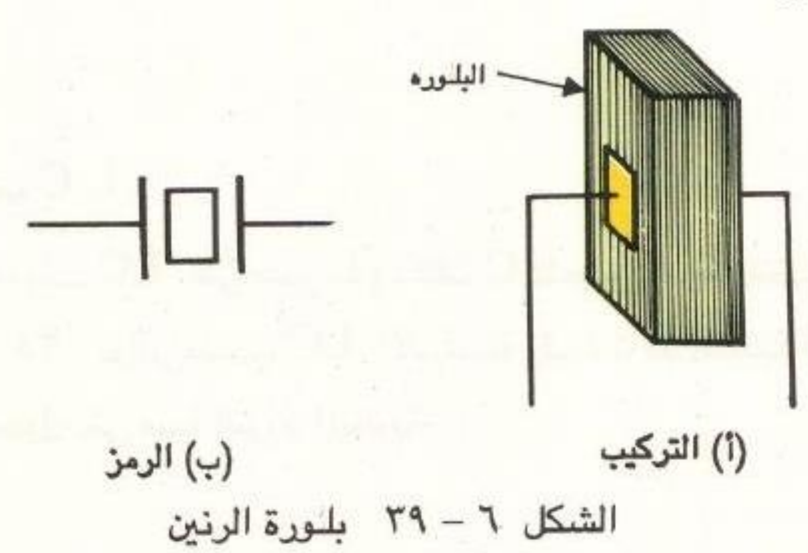


(ب) مذبذب كولبيتسي (أ) مذبذب هارتلي

الشكل ٦ – ٣٨ مذبذبات L C

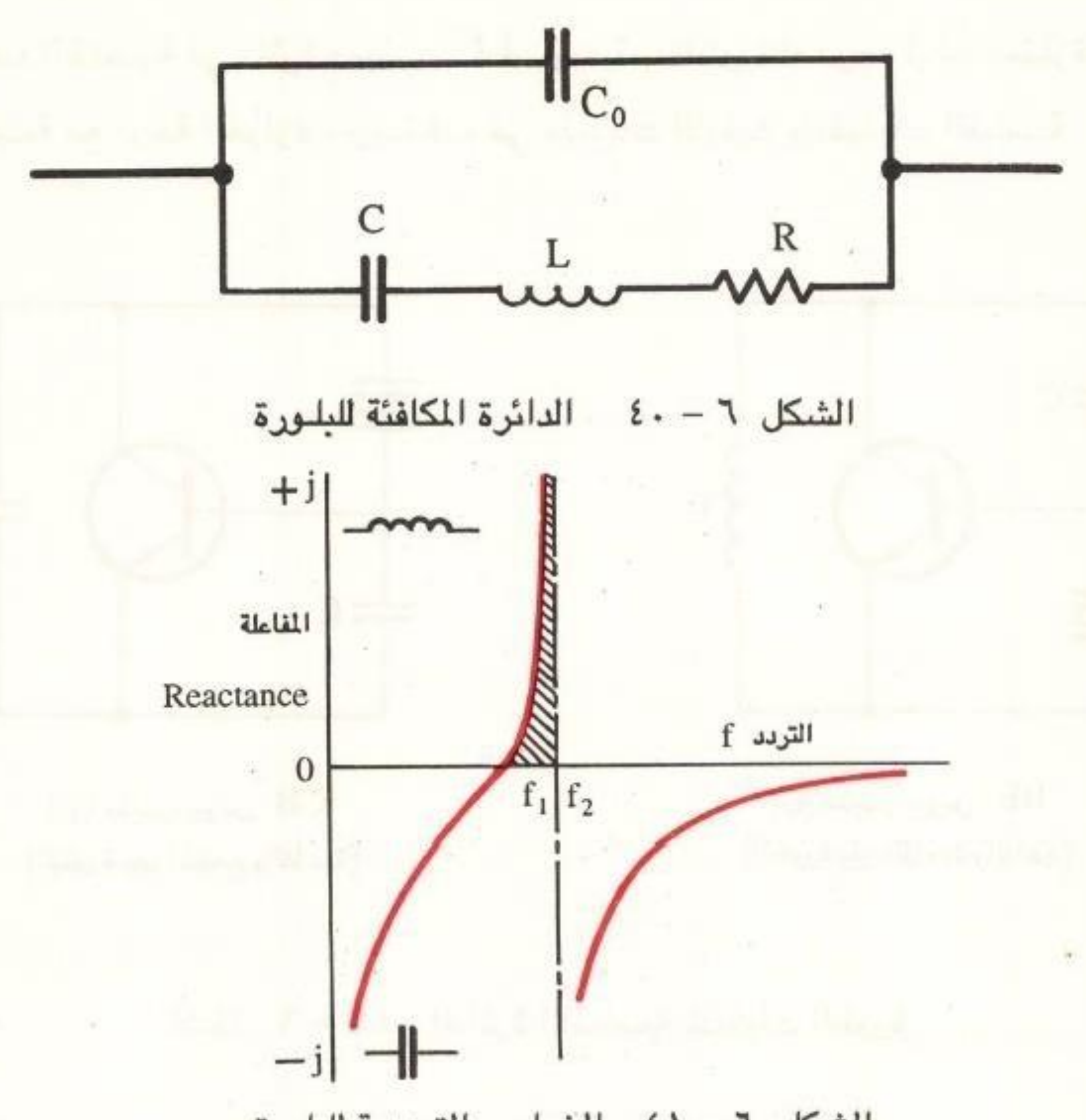
حـ – دائرة مذبذب البلورة

يمكن لبلورة الكوارتز أن تغير من شكلها إذا وصل إليها جهد معين ، ويكون تغير الشكل أكبر ما يمكن عند تردد معين مما يدل على وجود رنين . ومذبذب البلورة يتكون من قطعة بلورية في شكل مستطيل ومثبتة بأقطاب لإمكانية استخدام خواص الرنين . ويبين الشكل ٦ – ٣٩ (ب) رمز البلورة .



(ب) الرمز (أ) التركيب

الشكل ٦ – ٣٩ بلورة الرنين



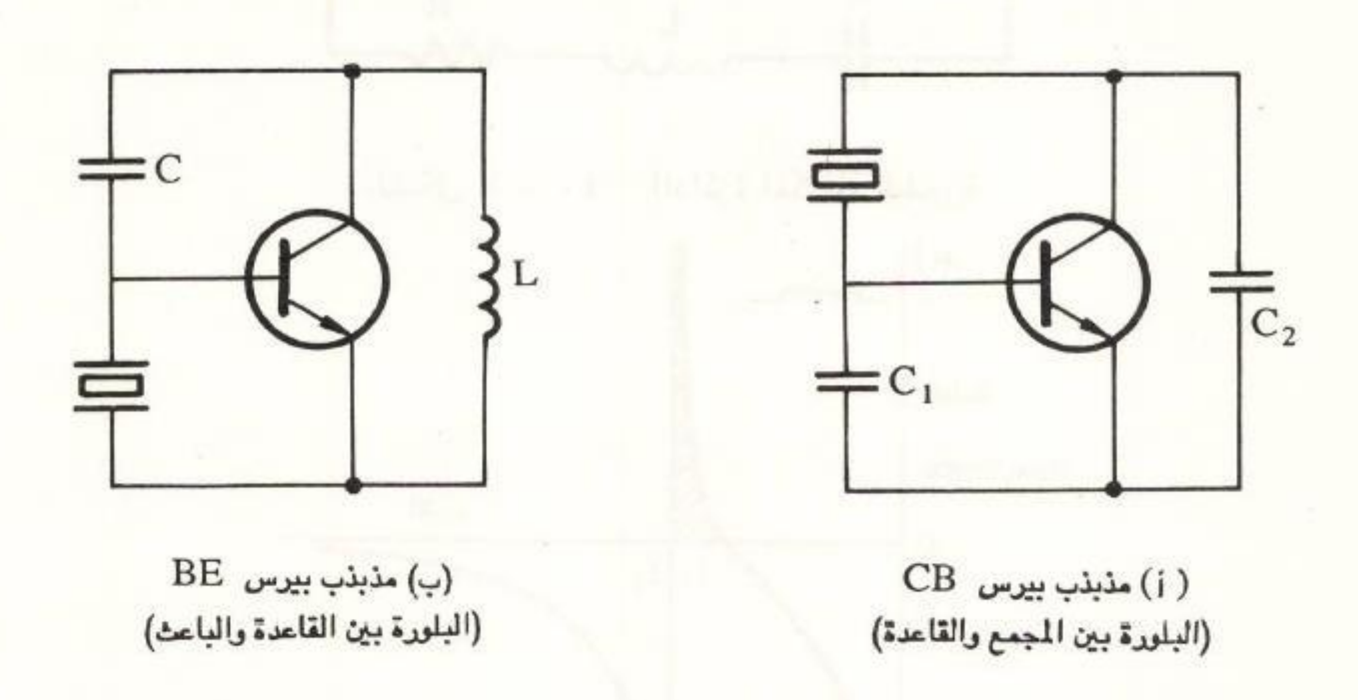
الشكل ٦ – ٤٠ الدائرة المكافئة للبلورة

الشكل ٦ – ٤١ الخواص الترددية للبلورة

ويبين الشكل ٦ – ٤٠ الدائرة المكافئة للبلورة . أما الشكل ٦ – ٤١ فيبين الخواص الترددية لهذه الدائرة ويظهر منها أن البلورة تعمل كمكثف في الحيز الترددى من صفر إلى (f_1) وتعمل كملف في الحيز الترددى من (f_1) إلى (f_2) ثم تعمل كمكثف عند الترددات الأعلى من (f_2) .

والحيز الترددي الذي تعمل فيه البلورة كملف ضيق جداً ، وله ثبات كبير بالنسبة لتغيرات درجة الحرارة إذا كانت البلورة مقطوعة بطريقة دقيقة صحيحة . وتستخدم دائرة مذبذب

البلورة هذه الخاصية في دائرة مذبذب LC . ومذبذب البلورة له درجة ثبات ممتازة بالنسبة لتردد الذبذبة مع درجة الحرارة ، ويستخدم في مذبذبات التوقيت والمذبذبات القياسية .



(ب) مذبذب بيرس BE
(البلورة بين القاعدة والباعث)

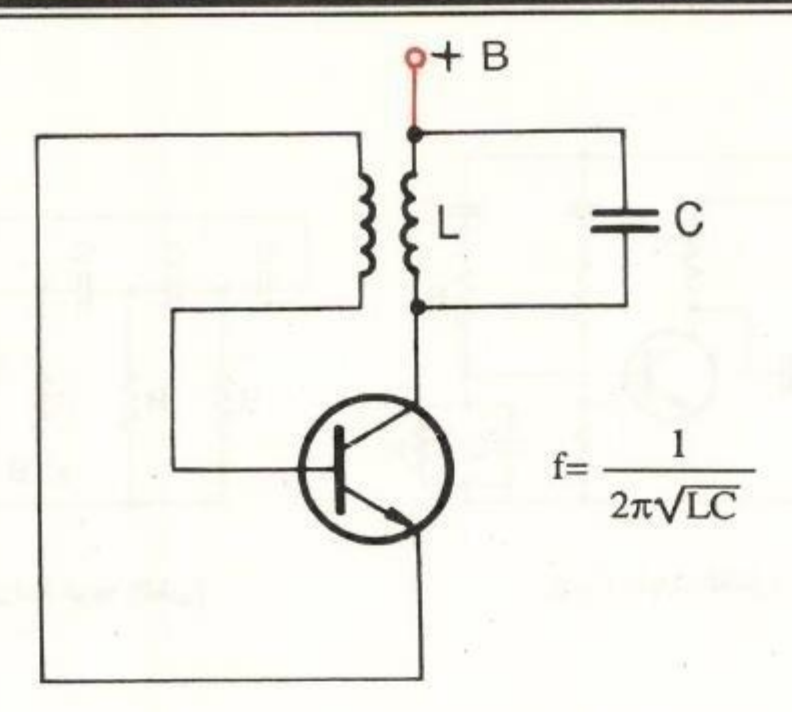
(أ) مذبذب بيرس CB
(البلورة بين المجمع والقاعدة)

الشكل ٦ – ٤٢ الدائرة الأساسية لمذبذبات البلورة

ويبين الشكل ٦ – ٤٢ دوائر المذبذبات البلورية حيث تشمل الدائرة ترانزستور وبلورة بجانب العناصر الأخرى .

د – مذبذب الازدواج الخلفى Back coupling ومذبذب المقاومة والمكثف

يستخدم مذبذب الازدواج الخلفى محولاً يقوم بعملية تغذية راجعة لجزء من جهد الخرج إلى الدخل . ويقوم المحول بإجراء عملية عكس زاوية الطور بكل سهولة . ويبين الشكل ٦ – ٤٣ دائرة مذبذب المجمع المتوالف .

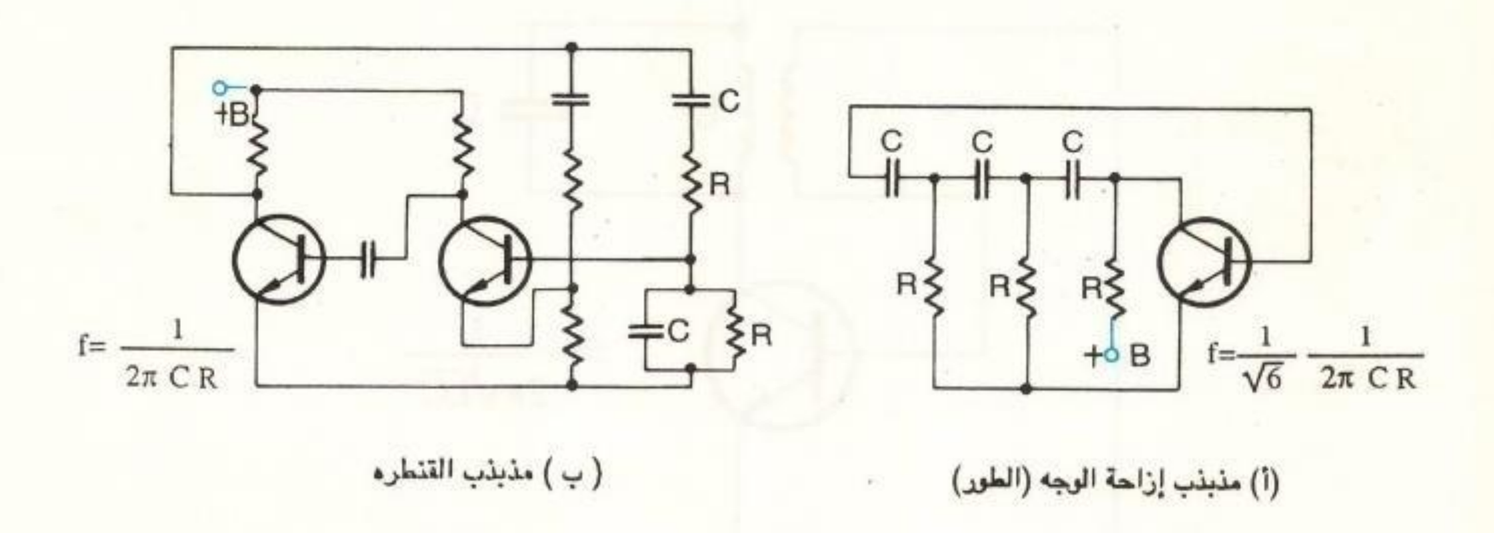


الشكل ٦ – ٤٣ مذبذب المجمع المتوالف

Tuned collector oscillation circuit

في دوائر مذبذب المقاومة والمكثف (التى تحتوى على نوع إزاحة الطور ونوع القنطرة) يتم تغيير زاوية الطور باستخدام المقاومات والمكثفات . ويبين الشكل ٦–٤٤ الدوائر الأساسية لهذه المذبذبات ، ويستخدم مذبذب المقاومة والمكثف للحصول على ذبذبات ذات ترددات منخفضة .

يستخدم المذيذب من نوع إزاحة الطور في دوائر الذبذبة ثابتة التردد ؛ أما المذبذب من نوع القنطرة فيستخدم للحصول على الترددات المنخفضة المتغيرة لأن التردد يتغير على نطاق واسع عند تغيير قيمة R , C .



(ب) مذبذب القنطره

(أ) مذبذب إزاحة الوجه (الطور)

الشكل ٦ – ٤٤ مذبذبات المقاومة والمكثف

٦ – ٤ العناصر المختلفة المصنوعة من أشباه الموصلات

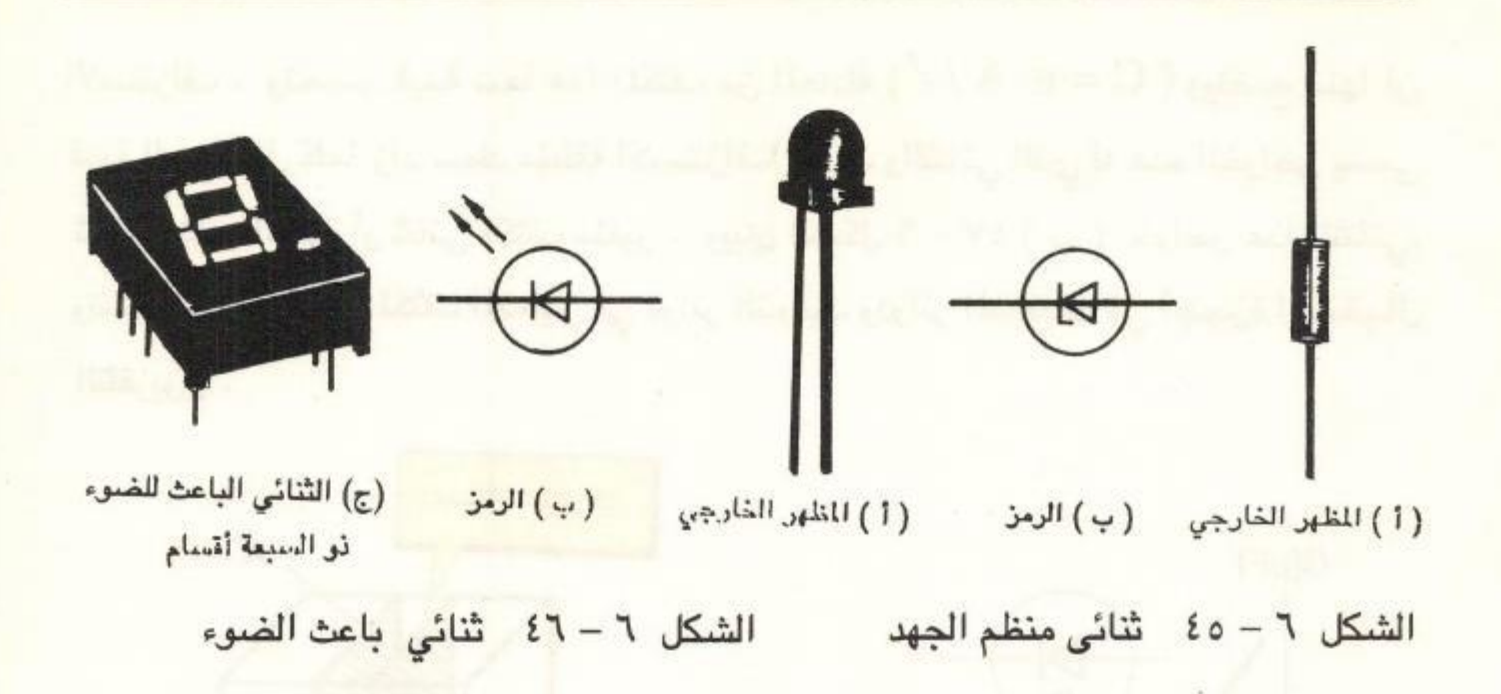
٦ – ٤ – ١ الأنواع المختلفة من الثنائيات

هناك أنواع كثيرة للثنائيات لها إستخدامات أخرى غير تقويم التيار المتغير(المتردد). في هذا الجزء سنقوم بدراسة خواص واستخدام عدد من الثنائيات .

أ – ثنائي منظم الجهد Voltage regulaton diode

كما هو معروف فإن الزيادة التدريجية للجهد العكسي على الثنائي تؤدي إلى ظاهرة الانهيار . وتنشأ هذه الظاهرة لأن الحاملات تتحرك بعجلة تزايدية في الاتجاه العكسى وتنفصل الإلكترونات من المدارات الخارجية وتكون مزيداً من الحاملات بصورة مستمرة .

وثنائيات منظم الجهد لها خواص تعمل على تنظيم الجهد ضد الجهد العكسي، وتستخدم عادة للحصول على جهد قياسي في دوائر تنظيم جهد مصدر القدرة المستمر (DC) . ويبين الشكل ٦ – ٤٥ المظهر الخارجى ورمز ثنائى منظم الجهد .



الشكل ٦ – ٤٥ ثنائى منظم الجهد الشكل ٦ – ٤٦ ثنائي باعث الضوء

ب – الثنائي الباعث للضوء (Light Emission Diode (LED

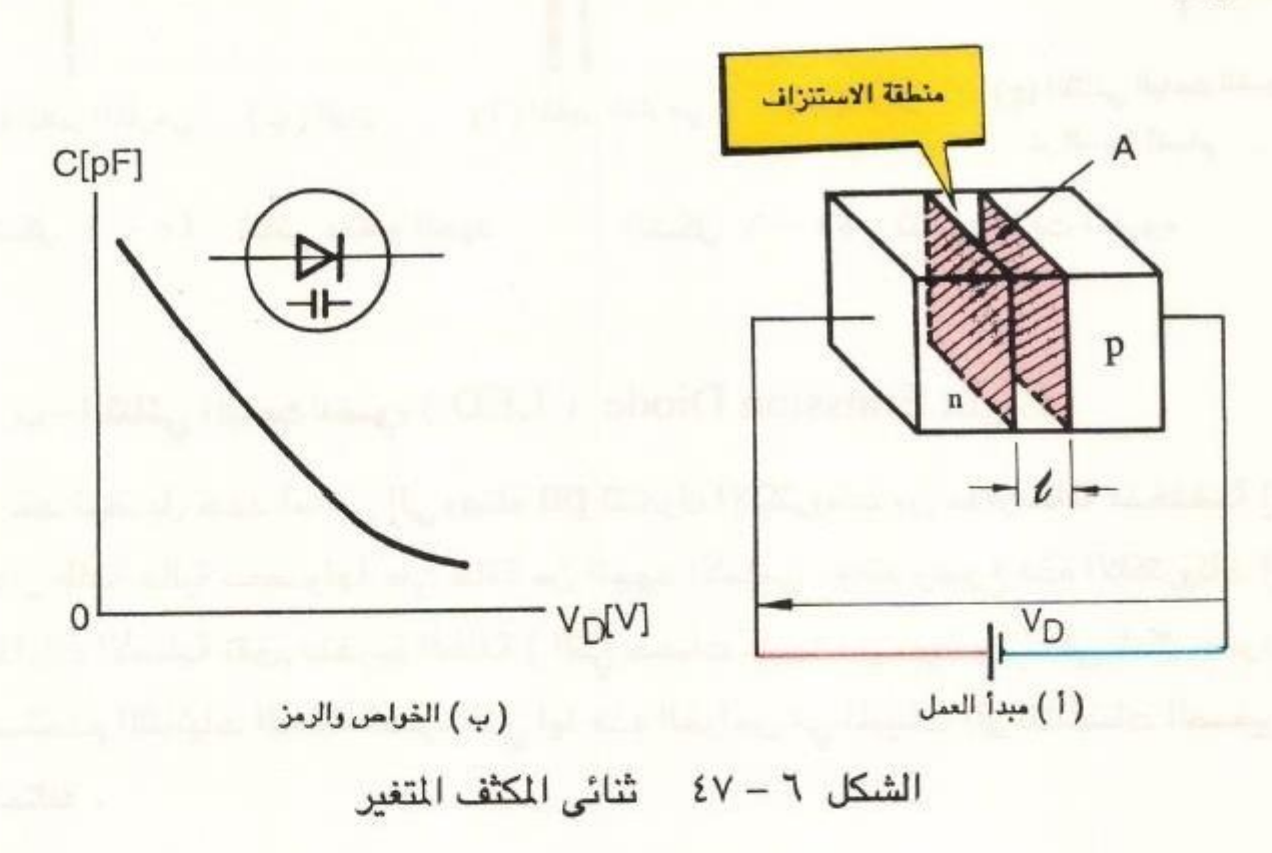
عند توصيل جهد أمامى إلى وصلة pn تتحرك الإلكترونات من مدار طاقة منخفضة إلى مدار طاقة عالية بحصولها على طاقة من الجهد الأمامي ، وعند رجوع هذه الالكترونات إلى المدارات الأصلية تقوم بتفريغ الطاقة (التي حصلت عليها من ذي قبل) فى شكل ضوء . وتستخدم الثنائيات الباعثة للضوء التي لها هذه الخواص في المبينات (أو الشاشات الصغيرة) المختلفة .

والثنائي الباعث للضوء ذو الأقسام السبعة المبين في الشكل ٦ – ٤٦ (ج) يستخدم لبيان الأرقام من صفر إلى 9 .

حـ – ثنائى المكثف المتغير (الثنائي متغير السعة) Variable capacitance diode

تصبح وصلة pn منطقة استنزاف كما عرفنا من قبل . وحيث إن منطقة الاستنزاف ليس بها حاملات فإنها تصبح عازلاً وتعمل كأنها مكثف . وبزيادة الجهد العكسي يزيد سمك منطقة

الاستنزاف ، وتحسب قيمة سعة هذا المكثف من المعادلة ($C = \in A / \ell$) ويتضح منها أن قيمة السعة تقل كلما زاد سمك منطقة الاستنزاف(ℓ) . والثنائي الذي له هذه الخواص يسمى ثنائى متغير السعة أو ثنائى مكثف متغير . ويبين الشكل ٦ – ٤٧ (ب) خواص هذا الثنائي، وتستخدم ثنائيات المكثف المتغير في دوائر التوليف ودوائر المذبذبات في أجهزة استقبال التلفزيون .



(أ) مبدأ العمل

(ب) الخواص والرمز

الشكل ٦ – ٤٧ ثنائى المكثف المتغير

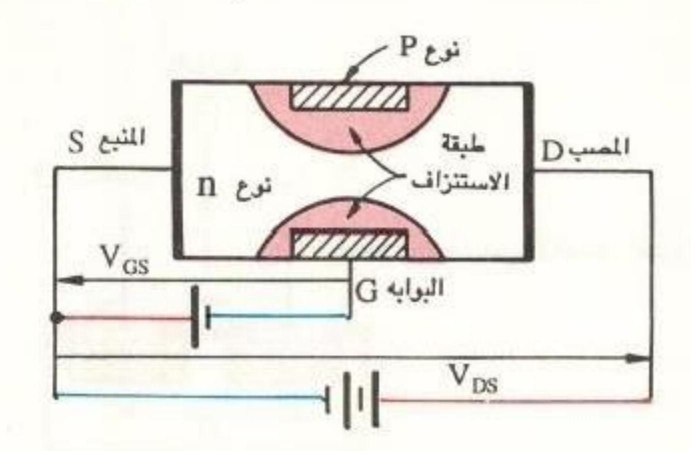
٦ – ٤ – ٢ الأنواع المختلفة من الترانزستورات

أ– ترانزستور تأثير المجال Field effect transistor (FET)

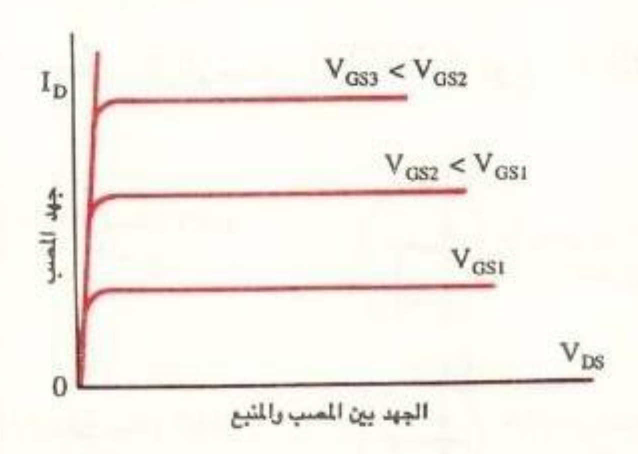
فى الشكل ٦ – ٤٨ نجد ترانزستور تأثير المجال (نوع الوصلة) له منطقة نوع – p صنعت في جزء من شبه موصل نوع – n وللترانزستور ثلاثة أقطاب هى المنبع والبوابة والمصب .

عند وضع جهد بين S و D فى الشكل ٦ - ٤٨ تتحرك الحاملات الإلكترونية من S إلى D وعند وضع جـهـد عكسى بين S و G يزيد الاستنزاف في وصلة pn مما يمنع الحاملات عن الحركة . أي إن جهد البوابة V_{GS} يتحكم في تيار المصب I_D ويختلف هذا النوع عن أنواع الترانزستورات التى درسناها من قبل، حيث إن الجهد العكسي بين G , S يستخدم لمنع التيار مما يجعل من السهل تصميم مكبر له ممانعة دخل عالية . ويبين الشكل ٦- ٤٩ خواص ترانزستور (FET) .

المكبر الذى له ممانعة دخل كبيرة يحتاج كمية قليلة من تيار مصدر الإشارة ، وهذا يناسب كل من تكبير الإشارات الصغيرة ومصدر الإشارة الذي له ممانعة داخلية كبيرة .



الشكل ٦ - ٤٨ مبدأ عمل ترانزستور (FET)

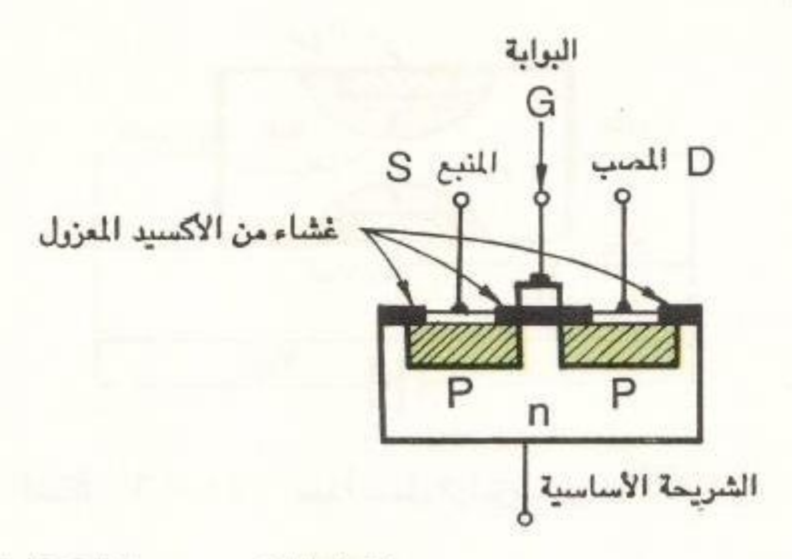


الشكل ٦ - ٤٩ منحنيات خواص ترانزستور (FET)

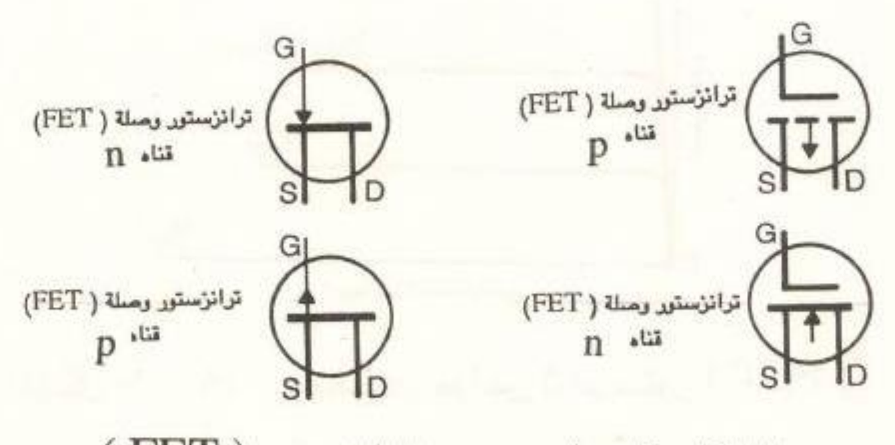
وتسمى المنطقة التى تتحرك فيها الحاملات القناة، وهناك قناة n وقناة p . أما الترانزستور المبين بالشكل ٦ – ٤٨ فهو ترانزستور وصلة (FET)، وترانزستور (FET) الذى يستخدم غشاء من العزل المؤكسد المبين في الشكل ٦ – ٥٠ ويسمى ترانزستور MOS FET {ترانزستور بوابة معزولة (FET) } .

ويقسم ترانزستور (MOS FET) إلى نوعين : نوع استنزاف به قناة في حالة عدم توصيل جهد البوابة، ونوع التعزيز وبه قناة صنعت عند توصيل جهد البوابة .

وتستهلك ترانزستورات FET قدرة أقل ، ويمكن تجميعها بصورة متقدمة ويبين الشكل ٦–٥١ رموز ترانزستور (FET) .



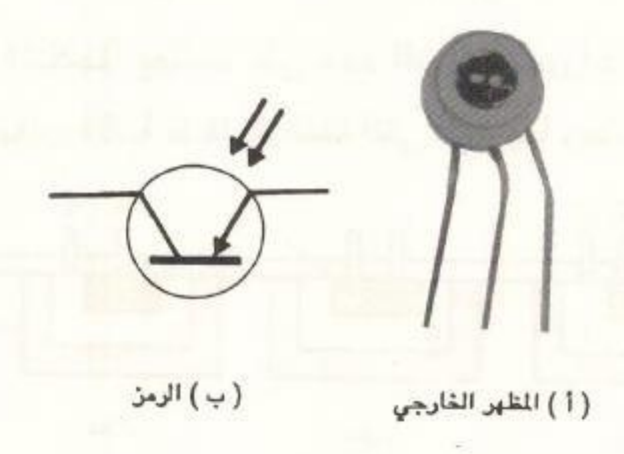
الشكل ٦ – ٥٠ ترانزستور (FET) نوع (MOS)



الشكل ٦ – ٥١ رموز ترانزستور (FET)

ب - الترانزستور الضوئى Phototransistor

عند تعريض وصلة ترانزستور pnp للضوء يمر تيار في المجمع . وهذا هو الترانزستور الضوئي ؛ ويبين الشكل ٦ - ٥٢ المظهر الخارجي ورمز الترانزستور الضوئى . وتستخدم الترانزستورات الضوئية لكشف الضوء .

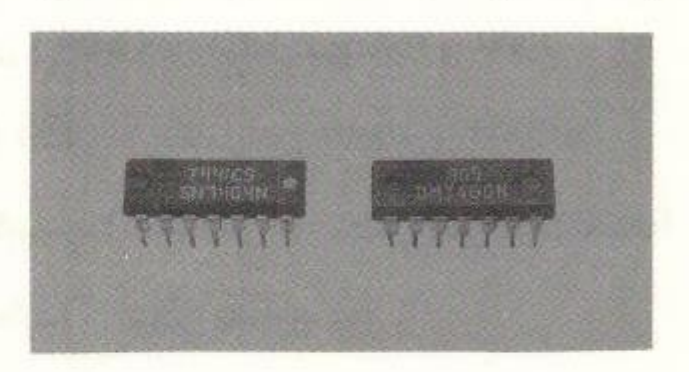


(أ) المظهر الخارجي (ب) الرمز

الشكل ٦ - ٥٢ الترانزستور الضوئى

٦ - ٤ - ٣ الدائرة المتكاملة (I C) Integrated circuit

الدائرة المتكاملة (IC) هى حزمة تتكون من ترانزستورات كثيرة وثنائيات ومقاومات ومكثفات مثبتة على شريحة أساسية شبه موصلة نوع - p أو نوع - n .



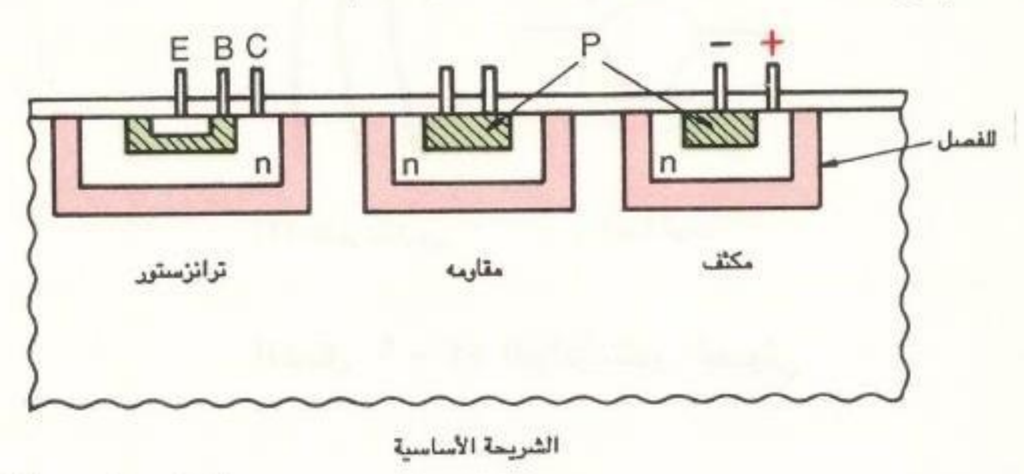
دوائر متكاملة ذات اطراف
8, 14, 16 , 20 , 24 , 40
وأكثر متوفرة ايضا

الشكل ٦ - ٥٣ الدائرة المتكاملة

يبين الشكل ٦ – ٥٣ صورة للدوائر المتكاملة أما الشكل ٦ – ٥٤ فيبين مثالاً للدوائر المتكاملة ثنائية القطبية التي تحتوي على ترانزستور بين مكوناتها.

والمسافة بين أطراف الدائرة المتكاملة هى 2.53 مم ، وعند وضع الدائرة المتكاملة بحيث يمكن رؤية اسمها كما في الشكل ٦ – ٥٣ فإن الطرف الواقع أقصى اليسار في الناحية السفلية هو الطرف رقم 1 يليه باقي الأطراف تصاعدياً في اتجاه عكس اتجاه عقارب الساعة.

درجة تكامل الدائرة المتكاملة يعتمد على عدد الترانزستورات التى تحتويها . وتصنف الدوائر المتكاملة إلى الطبقات الآتية طبقا للوظيفة التى تقوم بها وعدد العناصر التى تحتويها :



الشكل ٦ – ٥٤ تركيب الدائرة المتكاملة ثنائية القطبية Biopolar IC

* التكامل صغير المدى (SSI) : تكامل أقل من 100
* التكامل متوسط المدى (MSI) : تكامل بين 100 و 1000
* التكامل كبير المدى (LSI) : تكامل بين 1000 و 100000
* التكامل ذو المدى الكبير جدا (VLSI) : تكامل أكبر من 100000
* الدائرة المتكاملة التمثيلية : مكبر تشغيل
* الدائرة المتكاملة الرقمية :

- دائرة منطقية من الثنائى والترانزستور (DTL)

وعناصر تكوينها الثنائيات والترانزستورات

- دائرة منطقية من الترانزستور (TTL)

وعناصر تكوينها الترانزستورات

ونعرض فيما يلى نماذج من هذه الدوائر المتكاملة .

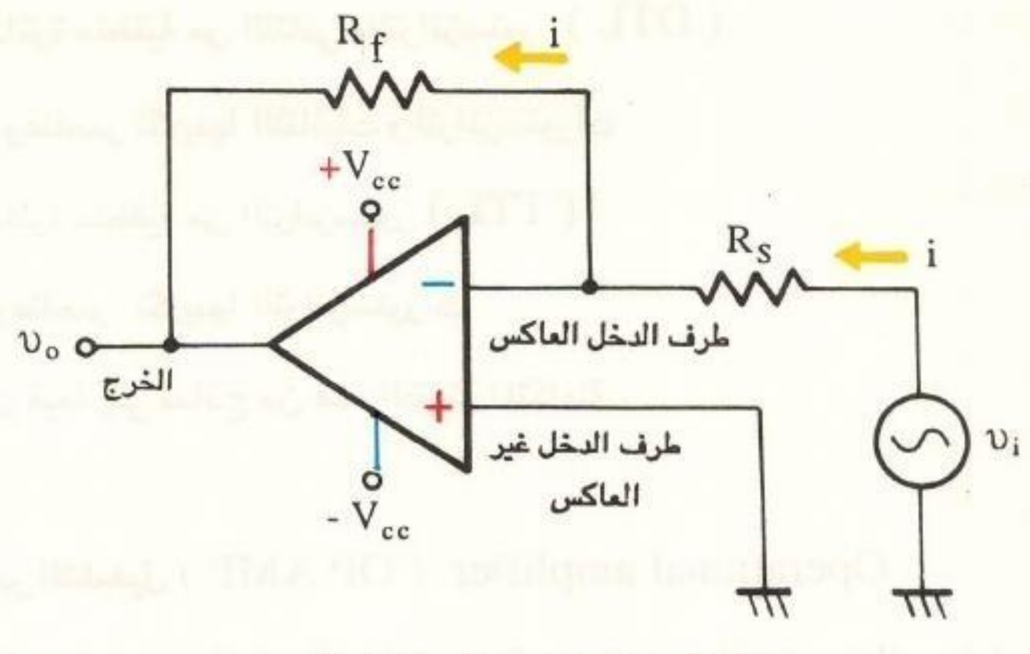
أ- مكبر التشغيل (Operational amplifier (OP AMP

مكبر التشغيل هو دائرة متكاملة تقوم بتكبير الجهود المستمرة التى يتراوح ترددها من الصفر إلى قيم عالية للتردد، وهذا المكبر له درجة تكبير عالية وممانعة دخل لانهائية وممانعة خرج تساوى صفراً . ومكبر التشغيل له طرف دخل عاكس وطرف دخل غير عاكس ويحتاج على وجه العموم إلى مصدري قدرة مستمرة (DC) حوالى ± 15 ڤولت . ويبين الشكل ٦ – ٥٥ مثالاً لدائرة تكبير عكسي باستخدام التغذية الراجعة السالبة .

وعن طريق أداء التغذية الراجعة السالبة تعمل الدائرة بحيث يكون الجهد بين أطراف الدخل يساوى صفرا . وفى هذه الحالة فإن درجة التكبير تكون كما يلي :

$$i = \frac{\upsilon_i}{R_S} \quad , \quad \upsilon_o = -iR_f = -\frac{R_f}{R_S}\upsilon_i \quad ,$$

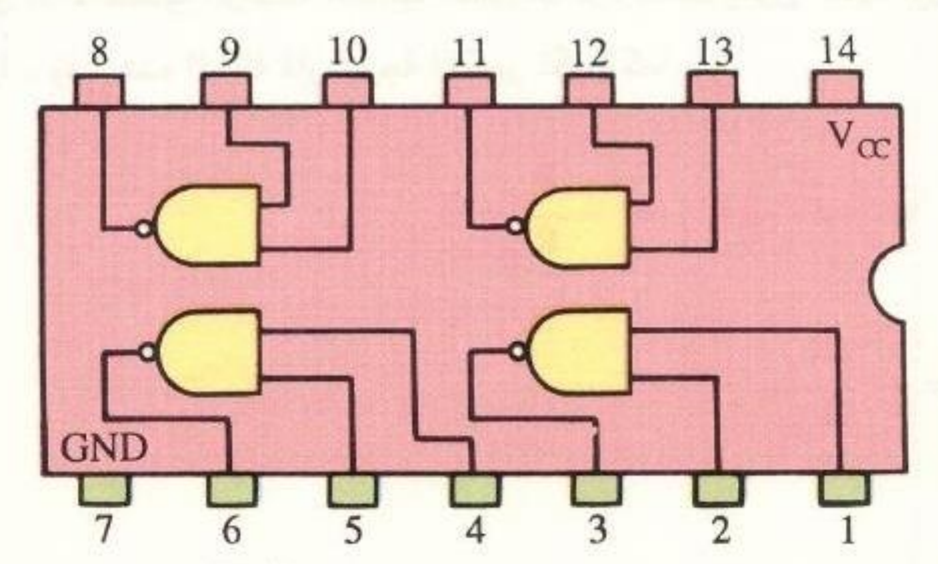
$$A = \frac{\upsilon_o}{\upsilon_i} = -\frac{R_f}{R_S}$$



الشكل ٦ – ٥٥ مكبر التشغيل

ب- الدائرة المتكاملة نوع (TTL)

تطورت الدائرة المتكاملة نوع (TTL) عن الدائرة المتكاملة نوع (DTL) وتستخدم عادة لأجهزة الدوائر المنطقية التى سنتناولها فيما بعد .



الشكل ٦ – ٥٦ التركيب الداخلى لدائرة متكاملة TTL طراز (IC 74000)

هذه الدائرة المتكاملة تشمل النوع القياسى والنوع ذا القدرة المنخفضة (Schoattky أوLS)
ويستخدم نوع (LS) عادة لأنه يستهلك قدرة أقل وله تحمل كبير للجهد .

ويبين الشكل ٦ – ٥٦ التركيب الداخلى لدائرة متكاملة(TTL) طراز (IC 7400)
وسيأتي شرح الرموز المستخدمة في هذا الشكل فيما بعد .

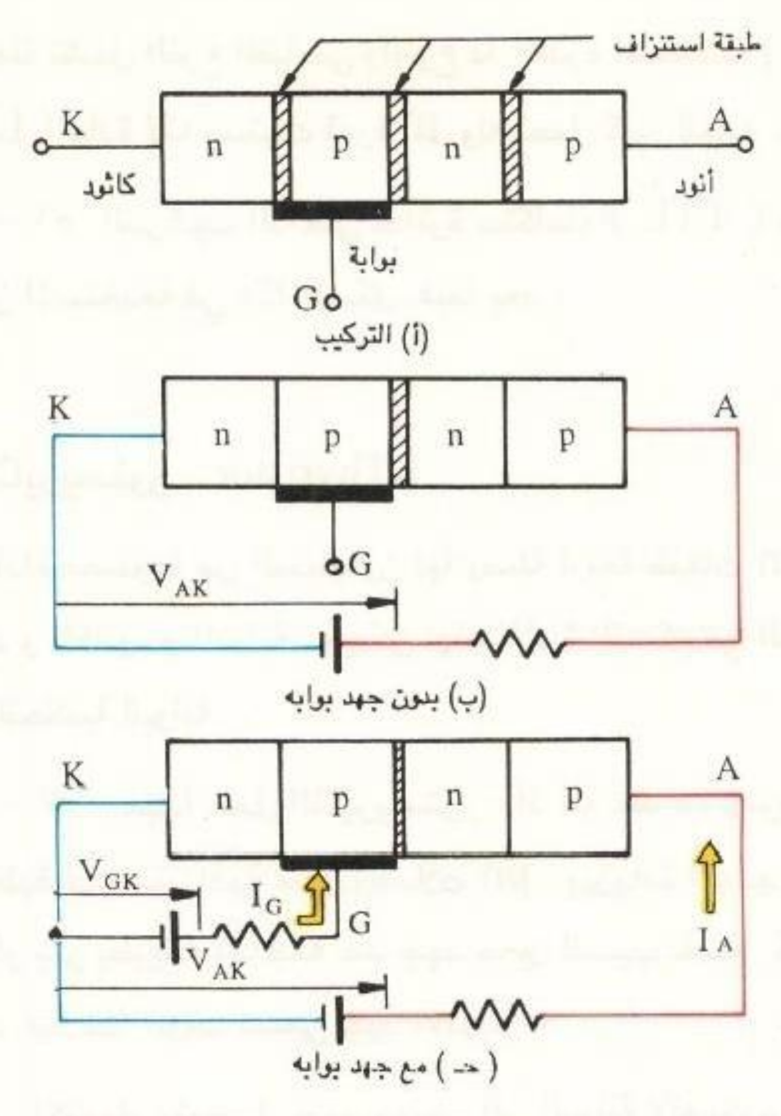
٦ – ٤ – ٤ الثايريستور Thyristor

الثايريستور هو أداة مصنوعة من السيليكون لها وصلة أربعة طبقات pnpn وثلاثة أقطاب خارجية هى : الأنود و الكاثود و البوابة . ويمكن لهذه الأداة التحكم في الخرج بطريقة كبيرة باستخدام الوظيفة التحكمية للبوابة .

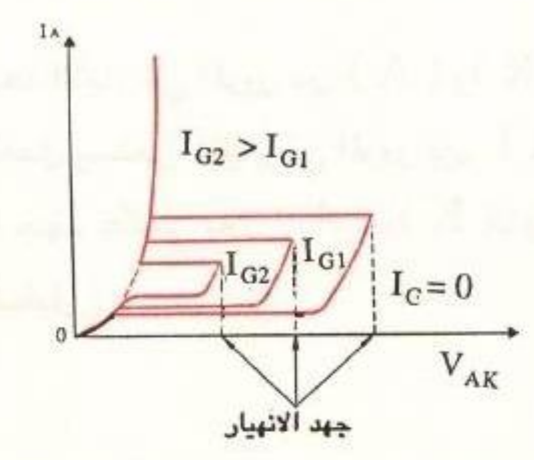
ويبين الشكل ٦ – ٥٧ مبدأ عمل الثايريستور . اذ أنه عند عدم توصيل أى جهد إلى البوابة تكون هناك طبقات استنزافية حول وصلات pn . وبزيادة الجهد بين (A) و (K) تدريجيًا يجعل التيار يمر بطريقة مفاجئة عند جهد معين للسبب نفسه كما في ثنائي منظم الجهد ، وقيمة الجهد عند هذا الوقت تسمى جهد الانهيار .

ويمكن التحكم في الانهيار بتوصيل جهد موجب إلى البوابة لأنه يقوم بتغيير سمك طبقة الاستنزاف .

إن الحالة التى يبدأ عندها التيار في المرور بين (A) و(K) تسمى التشغيل . وبمجرد أن يبدأ الثايريستور في العمل يستمر التيار في المرور بين (A) و(K)حتى لو أنقصنا تيار البوابة . وعند توصيل جهد عكسي بين (A) و(K)يتوقف مرور التيار وتسمى هذه الحالة الإبطال (إيقاف التشغيل) .

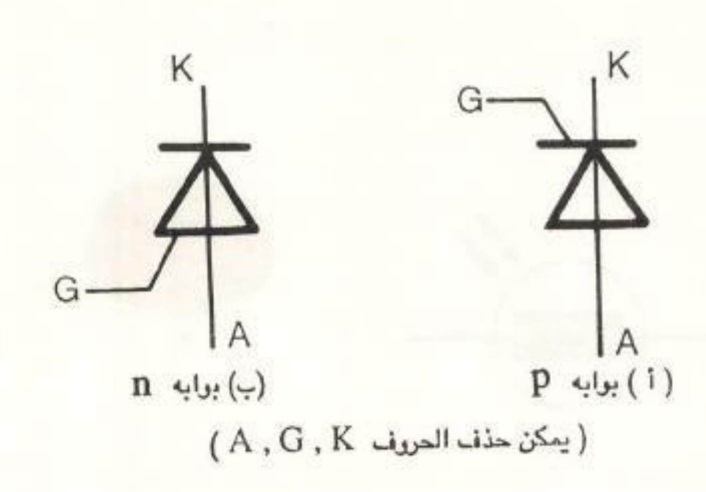


الشكل ٦ – ٥٧ مبدأ عمل الثايريستور



الشكل ٦ – ٥٨ خواص الثايريستور





الشكل ٦ – ٥٩ الشكل الخارجى ورموز الثايريستور

يبين الشكل ٦ – ٥٨ خواص الثايريستور ، ويمكن للثايريستور التحكم في وجه تيار متغير كبير باستخدام تيار متغير، كما يمكنه أيضًا التحكم في قدرة كبيرة باستخدام قدرة بوابة صغيرة في جهاز التحكم في شدة الإضاءة والتحكم في سرعة المحرك .

للثايريستور نوعان : بوابة p وهو الذي له بوابة مصنوعة من شبه موصل نوع – p في جانب الكاثود؛ وبوابة n الذي له بوابة من شبه موصل نوع – n في جانب الأنود . ويبين الشكل ٦ – ٥٩ الشكل الخارجي ورموز الثايريستور .

٦ – ٤ – ٥ عناصر أخرى من أشباه الموصلات

أ – الخلية الضوئية الموصلة Photoconductive cell

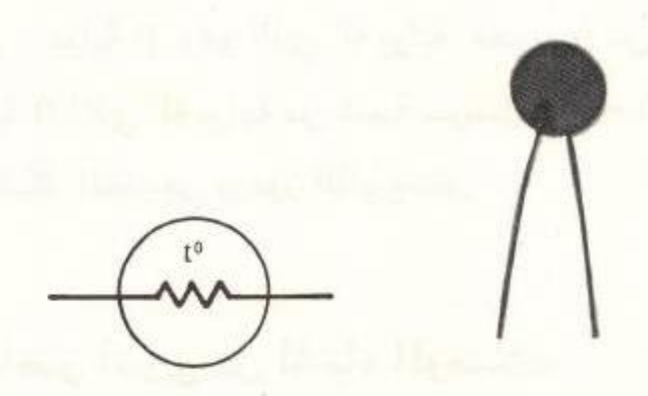
عند سقوط الضوء على نوع من أنواع أشباه الموصلات يكتسب شبه الموصل طاقة فيزيد عدد الحاملات وتقل مقاومته . ويسمى هذا النوع الخلية الضوئية الموصلة مثل خلية كبريتيد الكادميوم . ويبين الشكل ٦ – ٦٠ الشكل الخارجي ورمز هذه الخلية . تستخدم الخلايا

الضـوئية الموصلة في كشف الضـوء وفى مقـياس التـعرض للضـوء المسـتخـدم في كامـيرات التصوير الفوتوغرافية .



(أ) الشكل الخارجي (ب) الرمز

الشكل ٦ – ٦٠ الخلية الضوئية الموصلة



(أ) الشكل الخارجي (ب) الرمز

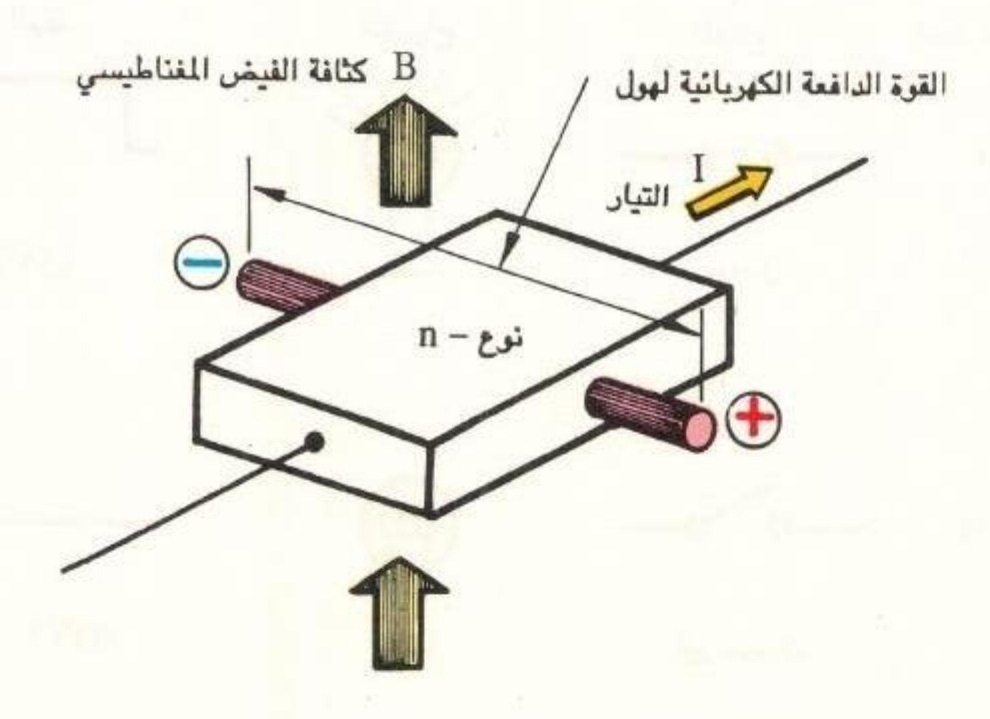
الشكل ٦ – ٦١ الثرميستور (المقاومة الحرارية)

ب - الثرميستور (المقاومة الحرارية) Thermistor

الثرميستور هو اداه من أشباه الموصلات تقل مقاومتها بإرتفاع درجه الحرارة . وعندما تقل مقاومتها يقل الجهد عليها ويستخدم التغير في هذا الجهد للتحكم في درجه الحرارة . يبين الشكل ٦ - ٦١ الشكل الخارجى ورمز الثرميستور .

حـ - أداة هـــول Hall device

يبين الشكل ٦ - ٦٢ أنه عند إمرار تيار في شبـه الموصل ووضع مـجال مـغناطيسي عموديا على اتجاه التيار يتولد جهد في اتجاه عمودي على كل من التيار والمجال المغناطيسي . وتسمى هذه الظاهرة تأثير هول، ويمكن تأكيدها بتطبيق قاعدة اليد اليسرى لفلمنج على حركة الحاملات في شبـه الموصل . وعندها ينشأ جهد يتناسب مع حاصل ضرب التيار في شدة المجال المغناطيسى . وتستخدم أداة هول في قياس الفيض المغناطيسي .



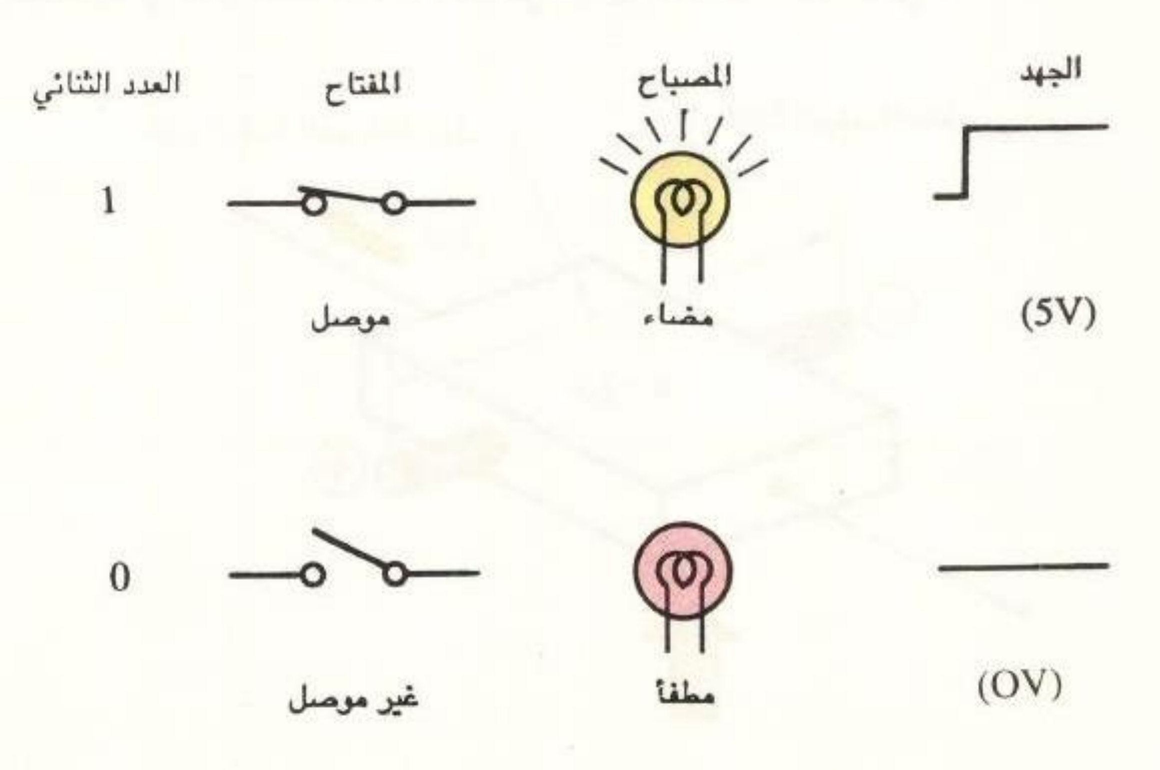
الشكل ٦ - ٦٢ تأثير هول

٦ – ٥ الدائرة المنطقيــة Logic circuit

٦ – ٥ – ١ الدائرة المنطقية الأساسية

أ – العدد الثنائى Binary number والدائرة المنطقية

الأرقام العشرية المستخدمة في حياتنا اليومية تحتوى على عشرة عناصر من صفر إلى 9 وفائض كل 10 . وعلى العكس فإن نظام العدد الثنائى يمثل الأرقام باستخدام عنصرين صفر و 1 والفائض كل 2 . وفى الدائرة الكهربائية قيم صفر و 1 تناظر حالتين مثل جهد مرتفع وجهد منخفض أو مفتاح موصل ومفتاح غير موصل كما في الشكل ٦ – ٦٣ . ففي الحاسوب ، باستخدام قيمتين مثل 5 ڤولت و 2 ڤولت مثلا ، يمكن إجراء العديد من العمليات الحسابية المختلفة . والدائرة المنطقية هى دائرة يتم فيها إجراء العمليات باستخدام قيمتين . وهناك أساساً ثلاثة دوائر منطقية وهي : دائرة (AND) ودائرة (OR) ودائرة (NOT) .



الشكل ٦ – ٦٣ التناظر بين العدد الثنائي والدائرة الكهربائية

ب - دائرة (AND)

في الدائرة المبينة في الشكل ٦ - ٦٤ تضيء اللمبة L عندما يكون كل من المفتاح A والمفتاح B فى وضع التوصيل .

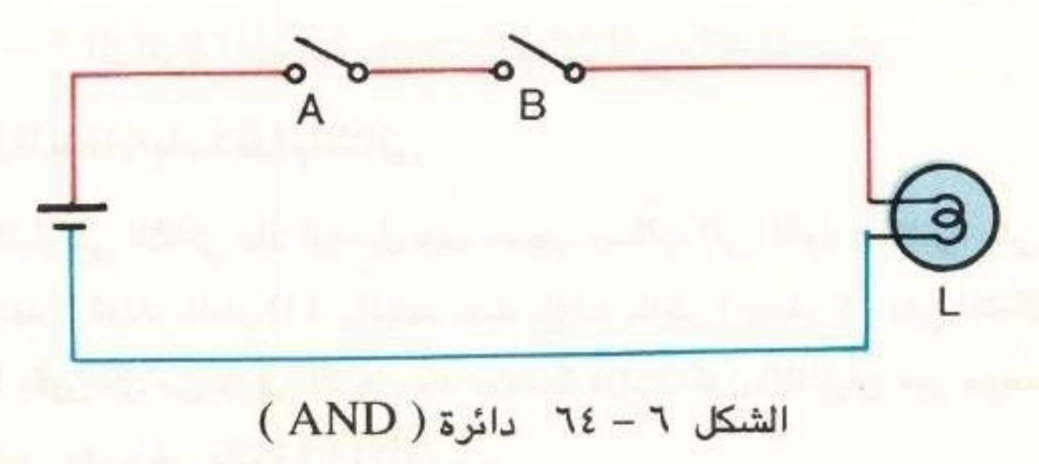
في دائرة AND (حاصل الضرب المنطقي) تشغيل المفتاح يناظر (1) وعدم تشغيله يناظر (صفر) . إضاءة اللمبة تناظر (1) وإطفائها يناظر (صفر) ويكون الخرج (1) عندما يكون كل نقاط الدخل (1) .

حـ - دائرة (OR)

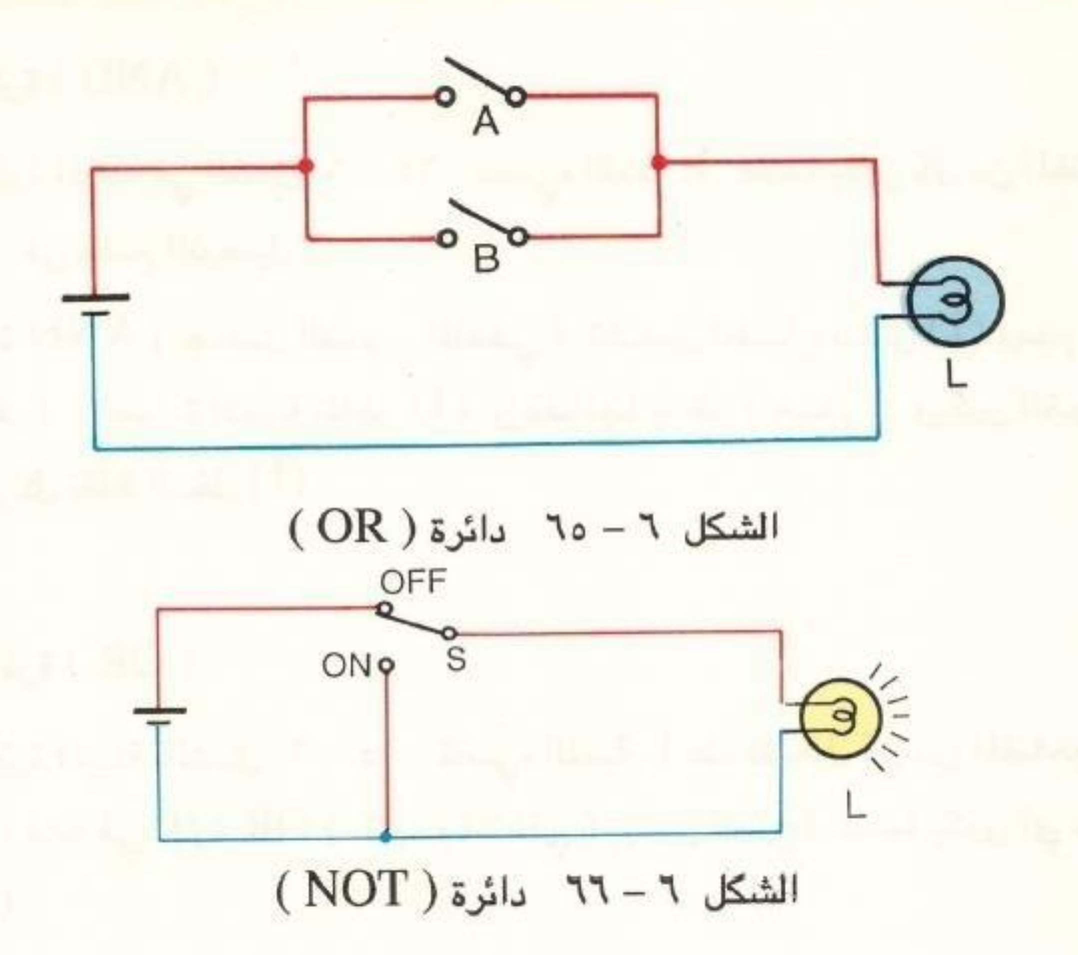
في الدائرة المبينة بالشكل ٦ - ٦٥ تضيء اللمبة L عند تشغيل أي من المفتاحين A أو B . وهكذا فإنه في دائرة OR (الجمع المنطقي) يكون الخرج1 عندما يكون أي من نقاط الدخل (1) .

د - دائرة (NOT)

في الدائرة المبينة بالشكل ٦ - ٦٦ تنطفئ اللمبة L عند عدم تشغيل المفتاح S وتضيء اللمبة عند تشغيلة .



الشكل ٦ - ٦٤ دائرة (AND)



الشكل ٦ – ٦٥ دائرة (OR)

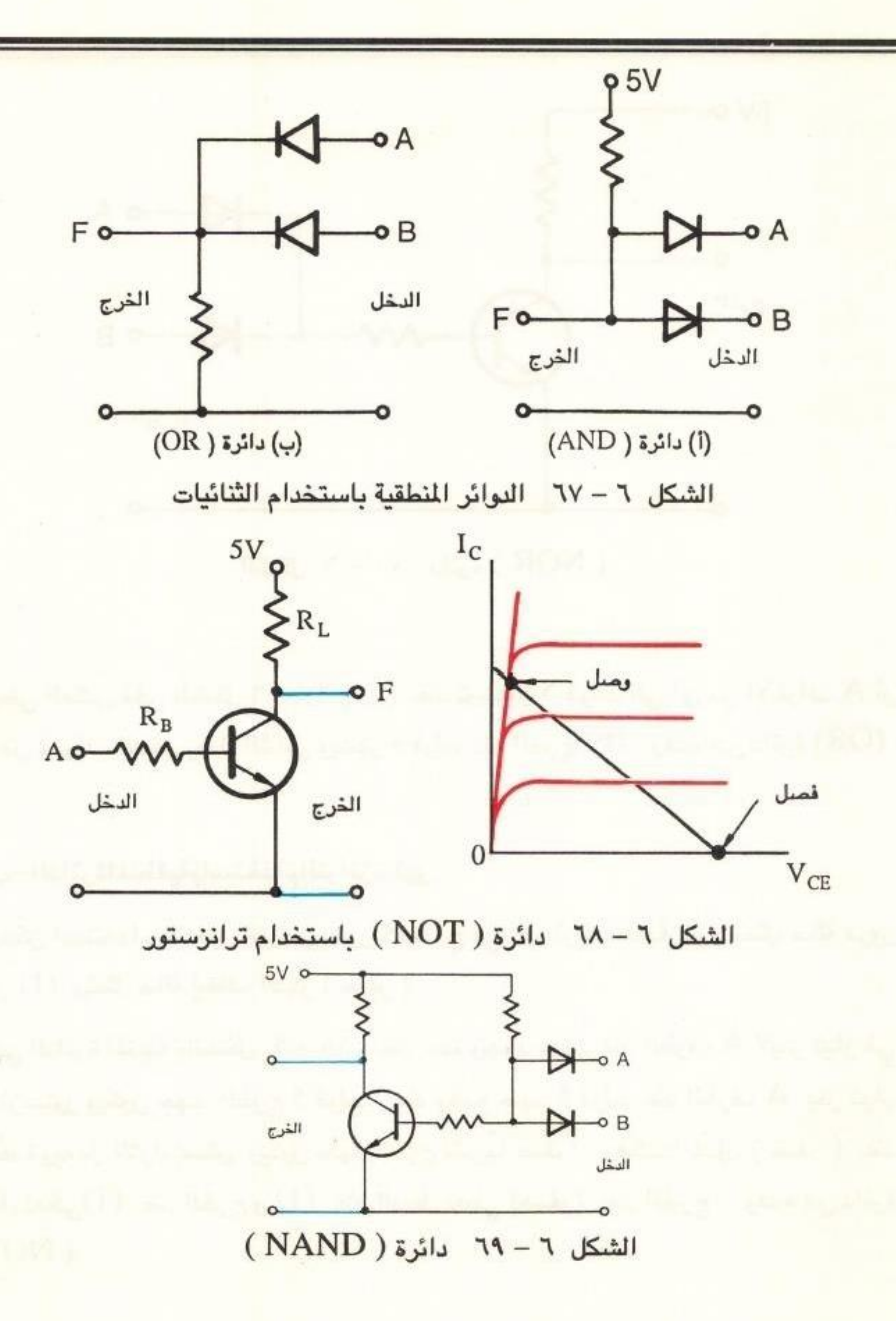
الشكل ٦ – ٦٦ دائرة (NOT)

أي إنه إذا كـان الدخل (1) يكون الخـرج (صـفـر) والعكس صـحـيح . ودائرة (NOT) تعكس إشارة الدخل .

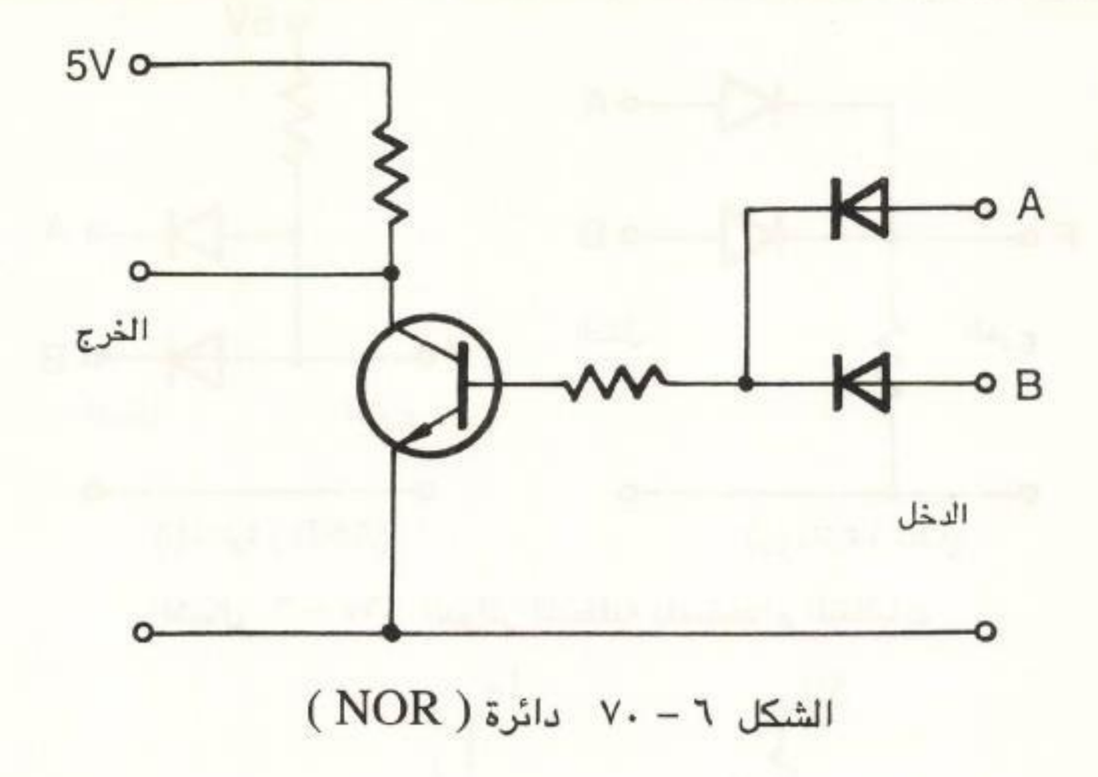
٦ – ٥ – ٢ الدائرة المنطقية باستخدام الثنائى والترانزستور

أ–الدائرةالمنطقيةباستخدام الثنائى

يمر التيار في الثنائي عند توصيل جهد موجب وسالب إلى الأنود والكاثود على الترتيب حيث إن الجهد 5 ڤولت يناظر (1) والجهد صفر ڤولت يناظر (صـفر) . وفي الشكل ٦ – ٦٧ (أ) عندما يكون كل من طرفى الدخل عند جـهد 5 ڤولت يكون الثنائيان غير موصلين ويكون الخرج 5 ڤولت . وهذه هى دائرة (AND) .



الشكل ٦ – ٦٩ دائرة (NAND)



الشكل ٦ – ٧٠ دائرة (NOR)

وعلى العكس ففى الشكل ٦ – ٦٧ (ب) عند توصيل 5 ڤولت إلى أى من الأطراف A أو B من أطراف الدخل يعمل الثنائى ويظهر 5 ڤولت عند الخرج (F) . وهذه هى دائرة (OR)

ب–الدائرة المنطقية باستخدام الترانزستور

يمكن استخدام تشغيل الترانزستور كمفتاح في الدوائر المنطقية حيث تمثل حالة مرور التيار (1) وتمثل حالة إيقاف التيار (صفر) .

في الدائرة المبينة بالشكل ٦ – ٦٨ عند عدم وجود جهد عند الطرف A لايمر تيار في الترانزستور ويكون جهد الخرج 5 ڤولت . عند وضع جهد 5 ڤولت عند الطرف A يمر تيار القاعدة ويعمل الترانزستور ويكون جهد الخرج تقريبًا صفرًا . وهكذا فإن (صفر) عند الدخل تعطى(1) عند الخرج و (1) عند الدخل تعطي (صفر) عند الخرج . وهذه هى دائرة (NOT) .

والدائرة المبينة في الشكل ٦ – ٦٩ هي دائرة (NAND) مكونة من تجميع دائرة (AND) ودائرة (NOT) . والدائرة المبينة في الشكل ٦ – ٧٠ هى دائرة (NOR) مكونة من تجميع دائرة (OR) مع دائرة (NOT) .

والدائرة المنطقية المكونة من دوائر متكاملة تعتمد على دوائر (NAND) ودوائر (NOR) باستخدام الترانزستور ، لأن الإشارة لاتنقص نتيجة للتكبير الحادث في الترانزستور .

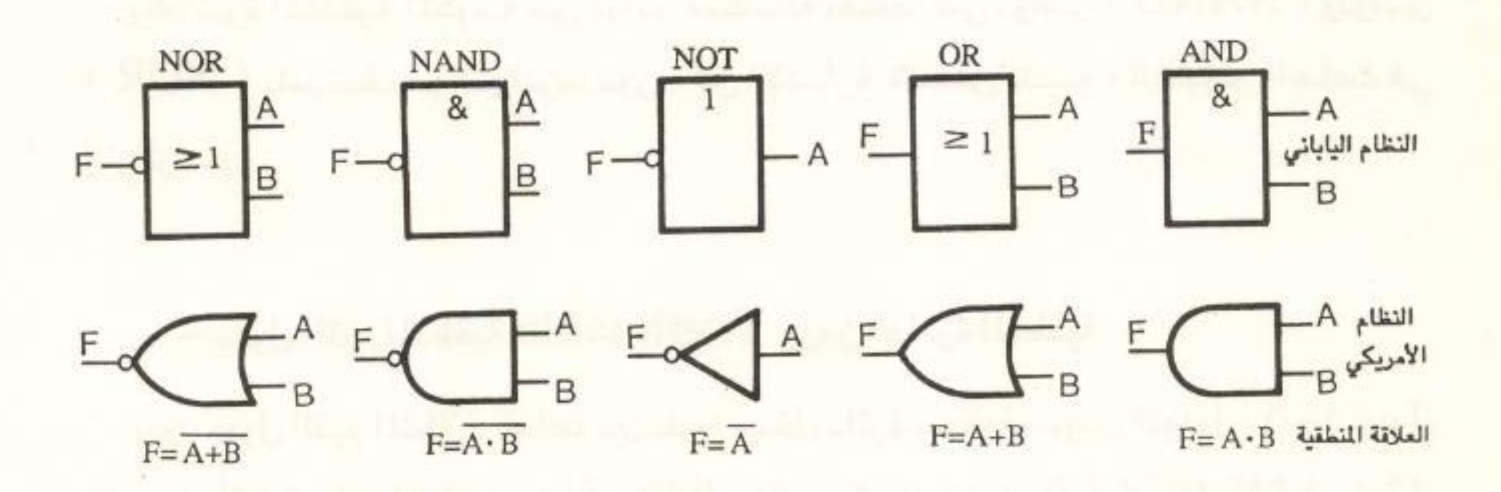
حـ – جدول القيم المنطقية Truth table ورمز الدائرة المنطقية

يبين جدول القيم المنطقية العلاقة بين خرج ودخل دائرة منطقية . ويبين الجدول ٦ –١ جدول القيم المنطقية للدوائر المنطقية . وبالاضافة إلى ذلك يمكن استخدام المعادلات المنطقية في تمثيل العلاقة بين الخرج والدخل للدوائر المنطقية . وفى هذه المعادلات نستخدم (٠) لتمثيل (AND) ونستخدم (+) لتمثيل (OR) ونستخدم الشرطة العلوية (‾) لتمثيل (NOT) .

الدخل		الخرج				
A	B	AND	OR	NOT(A)	NAND	NOR
		A.B	A+B	$\overline{A}$	$\overline{A.B}$	$\overline{A+B}$
0	0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1	0
1	1	1	1	0	0	0

الجدول ٦ – ١ جدول القيم المنطقية

ويبين الشكل ٦ – ٧١ رموز الدوائر المنطقية ، حيث وضع الصف العلوي طبقًا للنظام القياسي الياباني، والصف السفلي طبقًا للنظام القياسى الأمريكي .



الشكل ٦ – ٧١ رموز الدوائر المنطقية وعلاقاتها المنطقية

٦ – ٦ الحاسوب والدوائر المختلفة

٦ – ٦ – ١ تركيب الحاسوب Structure of a computer

يتكون الحاسوب أساسًا من الدوائر المنطقية التى سبق دراستها، ويستخدم الحاسوب في العمليات الحسابية المختلفة بالاضافة إلى أهميتة في المساعدة في ادارة الأعمال والتحكم فيها.

أ – تركيب الحاسوب

يبين الشكل ٦ – ٧٢ المظهر الخارجى لنظام الحاسوب . ويحتوى الحاسوب على خمسة عناصر : وحدة الإدخال ، و وحدة الإخراج ، ووحدة التشغيل ، ووحدة التحكم ، ووحدة الذاكرة . والوظائف الأساسية لهذه الوحدات هى الإدخال والإخراج والتشغيل والتحكم

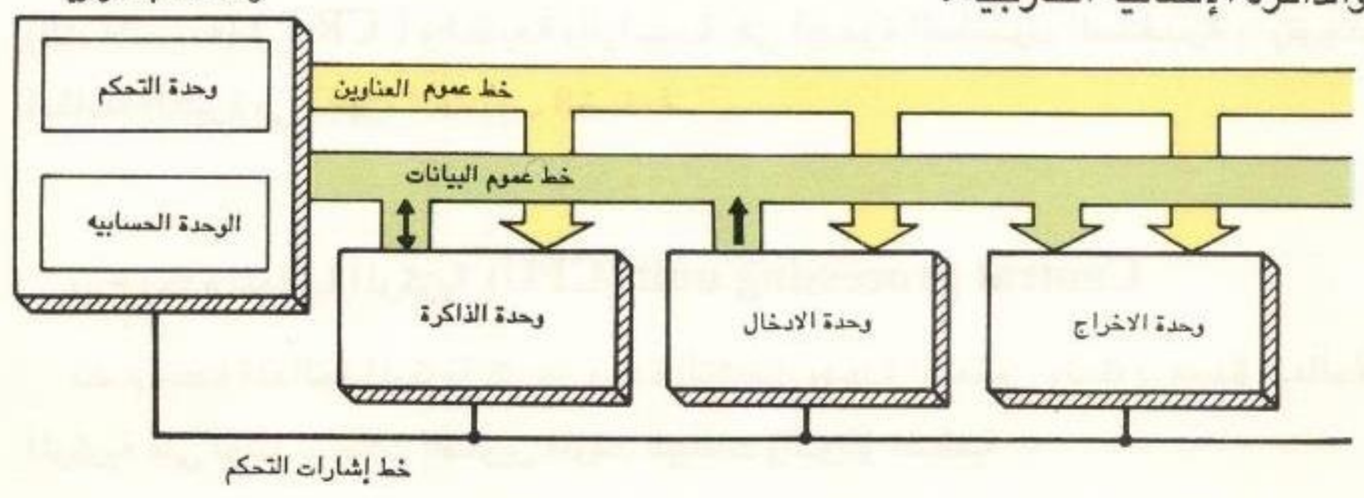
والذاكـرة علـى الترتيب . وتتصـل هذه الوحدات ببعضـها كما في الشكل ٦-٧٣ عن طريق خط عمــوم البيانـــات *(الذى يقـوم بإرسـال البيـانات مـثل القـيم العـددية) وخط عـموم العناوين**(الذى يرسل المعلومات إلى وحدة الذاكرة) وأسلاك إشارات التحكم (التي ترسل إشارات التحكم إلى كل وحدة) .



الشكل ٦ – ٧٢ نظام الحاسوب

وتحتوى وحدة الادخال على لوحة المفاتيح وأداة الترقيم وقارئ الكروت . ويجرى تخزين البرنامج والبيانات التى تأتى من وحدة الادخال في وحدة الذاكرة .

كمـا تحـتوى وحدة الذاكرة على الذاكـرة الرئيسـيـة الموجـودة داخل جـسم الحـاسـوب والذاكرة الإضافية الخارجية .



الشكل ٦ – ٧٣ تركيب الحاسوب

* المقصود بالبيانات الحقائق والمفاهيم والتوجيهات موضوعة في شكل مناسب لتوصيلها وفهمها ومعالجتها عن طريق الانسان أو أداة أتوماتيكية .

** خط العموم هو المسار المشترك لارسال البيانات من أية نقطة اختيارية ابتدائية إلى أية نقطة اختيارية من بين النقط النهائية (تعريف JIS).

وتستخدم الدوائر المتكاملة كبيرة المدى (LSI) للذاكرة الرئيسية التي تحتوي على الذاكرة ذات الوصول العشوائي (RAM) التي يمكن قراءة مابها من بيانات وكتابة البيانات فيها، وذاكرة القراءة فقط (ROM) والتى يمكن قراءة مابها من بيانات .

وتضم الذاكرة الإضافية الشرائط الممغنطة والأقراص الممغنطة التي تستخدم في الحواسيب الكبيرة والقرص المرن في الحواسيب الصغيرة .

وتقوم وحدة التحكم بتفهم تعليمات البرنامج المخزون في وحدة الذاكرة واحدة تلو الأخرى وتوجه كل وحدة لتنفيذ الاوامر الصادرة إليها .

كما تقوم وحدة التشغيل بالوصول إلى البيانات في الذاكرة طبقا لتوجيهات وحدة التحكم وتنفذ العملية وتخزن النتيجة في وحدة الذاكرة .

أما وحدة الأخراج فتقوم بإظهار نتائج هذه العمليات ، وهناك وحدة العرض (الشاشة) (CRT) والطابعة والراسمة فى أجهزة الحاسوب الصغيرة ، وتوجد الطابعة الكبيرة في أجهزة الحاسوب الضخمة .

ب – وحدة المعالجة المركزية Central processing unit (CPU)

تضم وحدة المعالجة المركزية كل من وحدة التشغيل ووحدة التحكم . وتحتوى وحدة المعالجة المركزية على دوائر سجلات التخزين المؤقت للبيانات والدوائر المنطقية .

فى الحاسوب ذي نظام التحكم التتابعى يتم تفهم وتنفيذ الأوامر واحداً بعد الآخر ، ثم الذهاب إلى الأمر التالي وهكذا ويكون هناك تكرار وتناوب لدورة الإحضار ودورة التنفيذ . ويمثل نبضات التوقيت الإشارات التي تحفظ العلاقات الزمنية . ويختلف تردد نبضات التوقيت من حاسوب لآخر وكلما زاد هذا التردد كان إجراء العمليات أسرع .

٦ – ٦ – ٢ الأعداد الثنائية والأعداد الستعشرية Hexadecimal numbers

الرقم العشرى يعبر عن الأعداد من صفر الى 9 وفائض كل 10. وفى نظام الأعداد العشرية يمثل الرقم 432 كما يلي :

$$432 = 4 \times 10^2 + 3 \times 10^1 + 2 \times 10^0$$

وكل وحدة من الرقم العشرى تناظر 10 مرفوعة لأس معين . وتسمى الـ 10 هنا القاعدة ومن ناحية أخرى فإنه في نظام الأعداد الثنائية يتم تمثيل الأعداد باستخدام العنصرين (صفر) و (1) وفائض كل 2 . كل وحدة تناظر 2 مرفوعة لأس معين . ونبين فيما يلى طريقة تحويل الرقم الثنائى 10011011 إلــى رقم عشرى .

الرقم الثنائى	1	0	0	1	1	0	1	1
القوة	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
الـوزن	128	64	32	16	8	4	2	1

الرقم العشرى $1 \times 128 + 0 \times 64 + 0 \times 32 + 1 \times 16 + 1 \times 8 + 0 \times 4 + 1 \times 2 + 1 \times 1 = 155$

وهكذا فإن الرقم الثنائى (10011011) هو الرقم العشرى (155) .

وعلى العكس فإنه عند التحويل من رقم عشرى إلى رقم ثنائى نقوم بقسمة الرقم العشرى على 2 ونستخدم التنظيم العكسى للمتبقى .

وفـــى هذا الكتـاب نضـع رقم 10 أو رقـم 2 في يمين العـدد بعـد وضـعـه بين قـوسين ( ) لتمييز الأعداد العشرية من الأعداد الثنائية .

وفي نظام الأعداد الستعشرى كل وحدة فيه تناظر 16 مرفوعة لأس معين وفائض كل 16.

ثنائية 2	ستعشرية 16	عشرية 10	ثنائية 2	ستعشرية 16	عشرية 10
1001	9	9	0	0	0
1010	A	10	1	1	1
1011	B	11	10	2	2
1100	C	12	11	3	3
1101	D	13	100	4	4
1110	E	14	101	5	5
1111	F	15	110	6	6
10000	10	16	111	7	7
10001	11	17	1000	8	8

الجدول ٦ – ٢ تمثيل الأرقام في أنظمة الأعداد الثنائية والعشرية والستعشرية

وفى هذا النظام تستخدم العناصر نفسها من صفر إلى 9 كما في النظام العشرى ثم تضاف الحروف الأبجدية من (A) إلى(F) لتمثيل الأعداد من (10) إلى (15) ويبين الجدول ٦ – ٢ العلاقة بين الأعداد الثنائية والعشرية والستعشرية.

ويمكن تحويل العدد $(2A)_{16}$ في النظام الستعشري إلى عدد عشري باستخدام الخطوات الآتية : الوحدة الواحدة من عناصر النظام الستعشري تناظر أربعة وحدات من الأعداد الثنائية . أي إن التحويل إلى عدد عشرى يمكن تنفيذه باستخدام العدد الثنائي .

$(2A)_{16} = 2 \times 16^1 + 10 \times 16^0 = 32 + 10 = (42)_{10}$

$(2A)_{16} = (00101010)_2 = 32 + 8 + 2 = (42)_{10}$

سؤال ٨

حوِّل الأعداد العشرية الآتية إلى أعداد ثنائية :

$(35)_{10}$ - $(100)_{10}$ - $(255)_{10}$ - $(500)_{10}$

يمكن إجراء عمليات الجمع والطرح للأعداد الثنائية . وتتم عملية الطرح عادة باستخدام المكمل لـ2 . نحصل على المكمل لـ2 لعدد ثنائى بتغيير (صفر) مكان (1) وتغيير (1) مكان (صفر) فى العدد الأصلى ثم إضافة 1 .

$$\begin{array}{r} 1 \\ +1 \\ \hline 10 \end{array} \quad \begin{array}{r} 0 \\ +1 \\ \hline 1 \end{array} \quad \begin{array}{r} 1 \\ +0 \\ \hline 1 \end{array} \quad \begin{array}{r} 0 \\ +0 \\ \hline 0 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 10 \\ -1 \\ \hline 1 \end{array} \quad \begin{array}{r} 1 \\ -1 \\ \hline 0 \end{array} \quad \begin{array}{r} 1 \\ -0 \\ \hline 1 \end{array} \quad \begin{array}{r} 0 \\ -0 \\ \hline 0 \end{array}$$

ونبين فيما يلى الطرح باستخدام المكمل لـ 2 :

المجموع	الفرق	الطرح باستخدام المكمل		المكمل لـ 2
101	1011	1011		1011
+110	-101	-0101	(نغير) → 1010(+1) →	+1011 ←
1011	110			10110

أضف 0 للحصول على نفس عدد الأماكن

احذف

الاجابه

0110

سؤال٩

احسب الأعداد الثنائية الآتية :

(1) 1011 + 1101 =

(2) 1110 - 111 =

٦ – ٦ – ٣ دائرة التشغيل Operational circuit

تقوم دائرة الجمع بتشغيل إضافة الأعداد الثنائية . في حين تقوم دائرة الجمع النصفي بتشغيل إضافة رقمين فقط . ودائرة الجمع الكلي تقوم بتشغيل الإضافة مع وجود الفائض . ويمكن إجراء الطرح بالإضافة باستخدام المكمل لـ 2 . بينما تتم عمليتي الضرب والقسمة باستخدام دوائر الجمع .

أ – دائرة الجمع النصفى Half - adding circuit

يبين الجدول ٦ – ٣ نتيجة إضافة رقمين ثنائيين A , B .

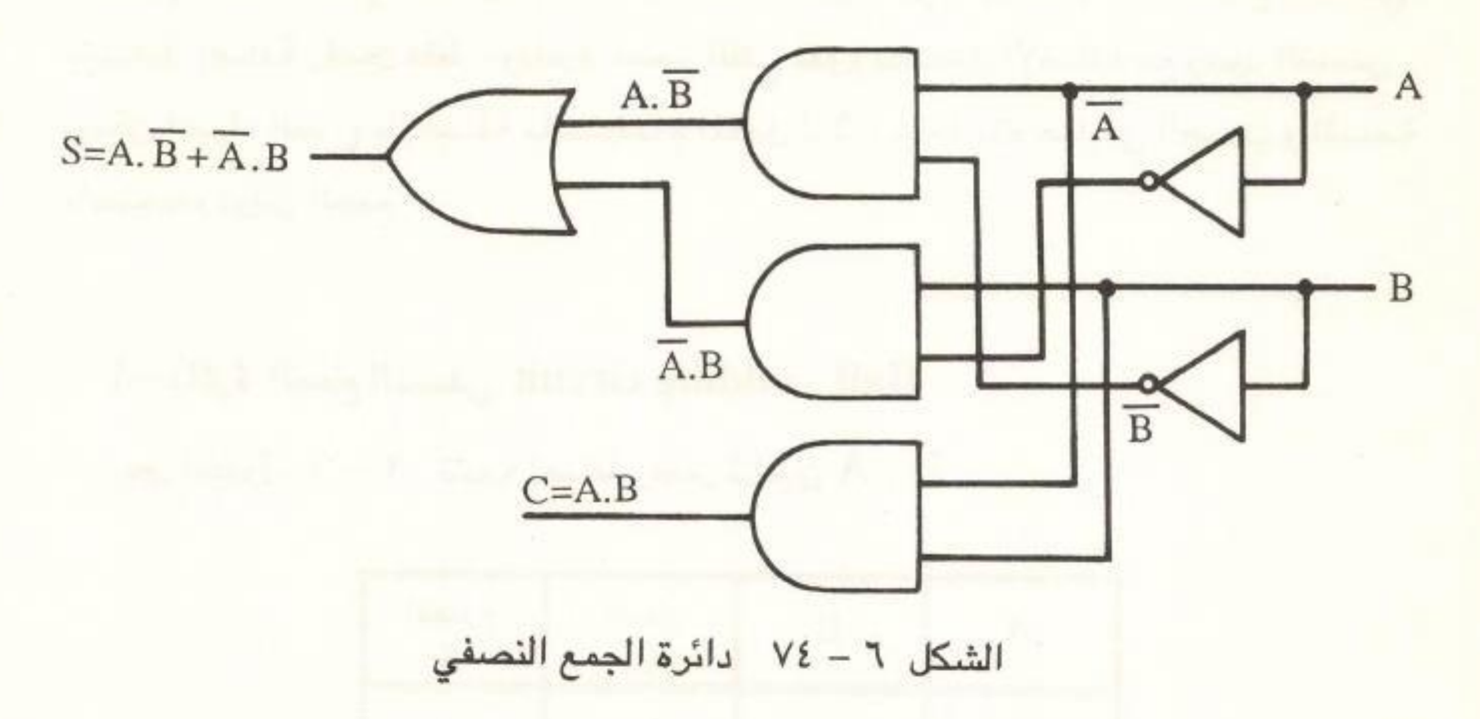
A	B	الحمل C	المجموع S
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

الجدول ٦ – ٣ جدول القيم المنطقية لدائرة الجمع النصفى

يمكن استنتاج المعادلة المنطقية من جدول القيم المنطقية بتوصيل (AND) لأطراف الدخل التى تعطي (1) ثم توصيل خرج دوائر (AND) إلى دائرة (OR) . وهكذا فإن المعادلات المنطقية لكل من C , S تكون كالآتى :

$$C = A . B , \qquad S = A . \overline{B} + \overline{A} . B$$

وطبقًا لهذه المعادلات المنطقية فإن الدائرة المنطقية لدائرة الجمــع النصفي يبينها الشكــل ٦ – ٧٤ .



الشكل ٦ – ٧٤ دائرة الجمع النصفي

ب – دائرة الجمع الكلي Full - adding circuit

تحتوي دائرة الجمع الكلي على ثلاثة أطراف للدخل لاحتواء الفائض من الوحدة الأقل عند الدخل . والمعادلات المنطقية لدائرة الجمع الكلي هى :

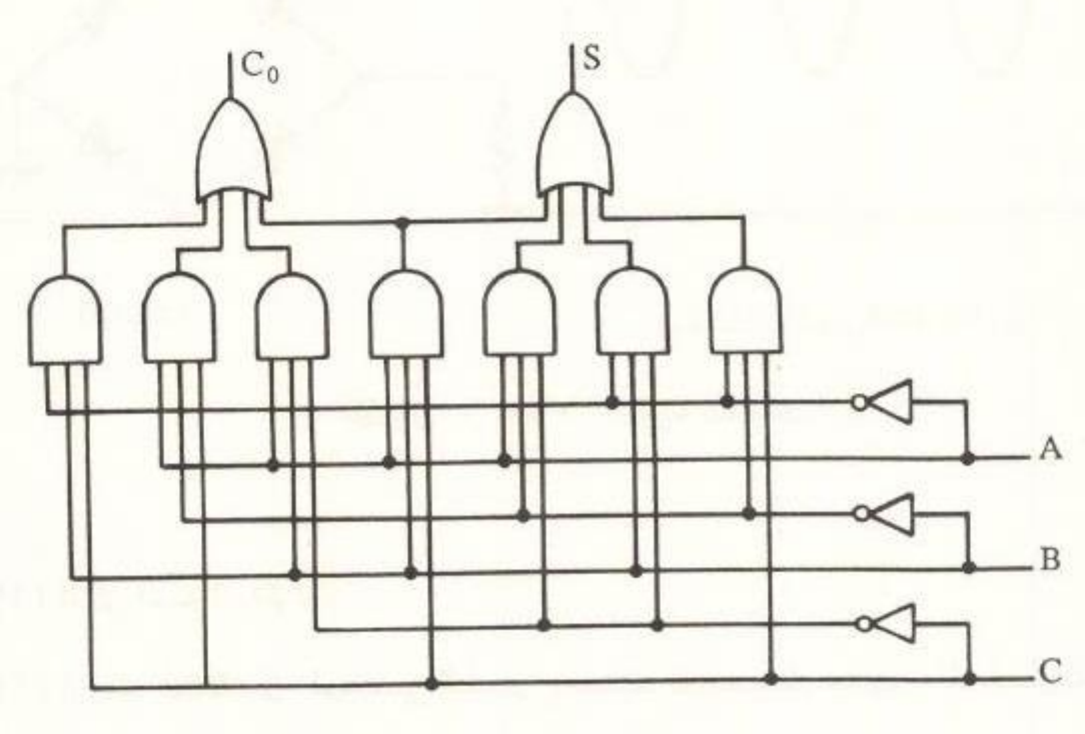
$$S = A \,.\, \overline{B} \,.\, \overline{C} + \overline{A} \,.\, B \,.\, \overline{C} + \overline{A} \,.\, \overline{B} \,.\, C + A \,.\, B \,.\, C$$

$$C_0 = \overline{A} \,.\, B \,.\, C + A \,.\, \overline{B} \,.\, C + A \,.\, B \,.\, \overline{C} + A \,.\, B \,.\, C$$

ويبين الشكل ٦ – ٧٥ مثالاً لدائرة الجمع الكلي .

C	A	B	الحمل C_0	المجموع S
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

الجدول ٦ – ٤ جدول القيم المنطقية لدائرة الجمع الكلي



الشكل ٦ – ٧٥ دائرة الجمع الكلى

تمارين

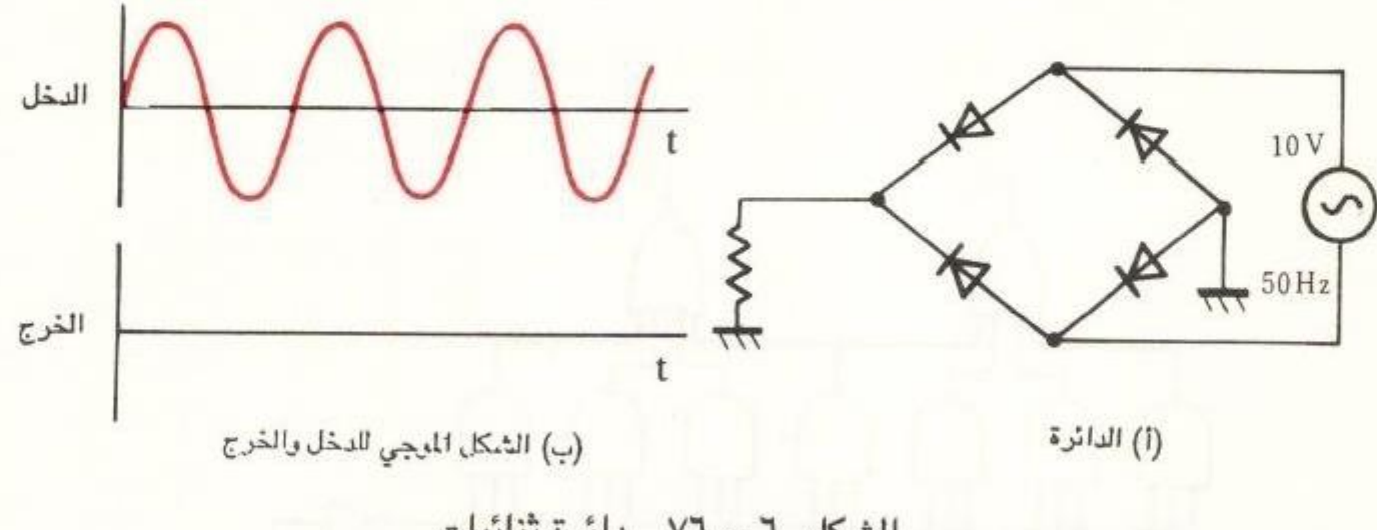
١ - اشرح التعبيرات الآتية :

(١)الكترون التكافؤ .　　(٢)شبه موصل نوع - n .

(٣) الحاملات الأغلبية في شبه موصل نوع - p .

(٤) الجهد الأمامى لوصلة pn .

٢ - أجب عن الأسئلة الآتية الخاصة بدائرة الثنائيات المبينة في الشكل ٦ - ٧٦ :



الشكل ٦ - ٧٦ دائرة ثنائيات

(١) اذكر اسم الدائرة .

(٢) ارسم الشكل الموجى للخرج عند توصيل جهد الدخل المبين في الشكل ٦ - ٧٦ (ب) .

(٣) كيف يمكن التخلص من التموجات ؟

(٤) احسب قيمة تردد تموجات الخرج اذا كان تردد الدخل 50 هرتز .

(٥) احسب أقصى قيمة لجهد الخرج إذا كانت القيمة الفعالة لجهد الدخل هى 10 ڤولت .

٣ – أجب عن الأسئلة الآتية الخاصة بالترانزستور المبين في الشكل ٦ – ٧٧ .

(١) اذكر نوع الترانزستور.

(٢) اذكر اسماء اطرافه .

(٣) اذكر وظيفة كل طرف .

(٤) قم بتوصيل 2 بطارية ومقاومة حمل للحصول على دائرة مكبر .

٤ – أجب عن الأسئلة الآتية الخاصة بدائرة الترانزستور المبينة في الشكل ٦–٧٨ .

(١) اذكر أسم دائرة الانحياز .

(٢) اذكر اسماء عناصر الدائرة .

(٣) اذكر وظيفة كل عنصر في الدائرة .

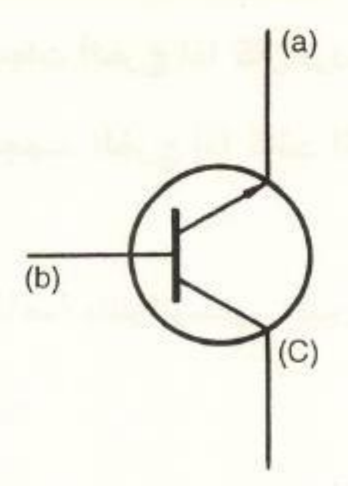
(٤) ارسم الدائرة المكافئة المبسطة .

(٥) اذا كان $R_3 = 6\ k\ \Omega,\ h_{fe} = 150\ ,\ h_{ie} = 4\ k\ \Omega$. احسب درجة تكبير الجهد A_V والكسب G_V [dB] .

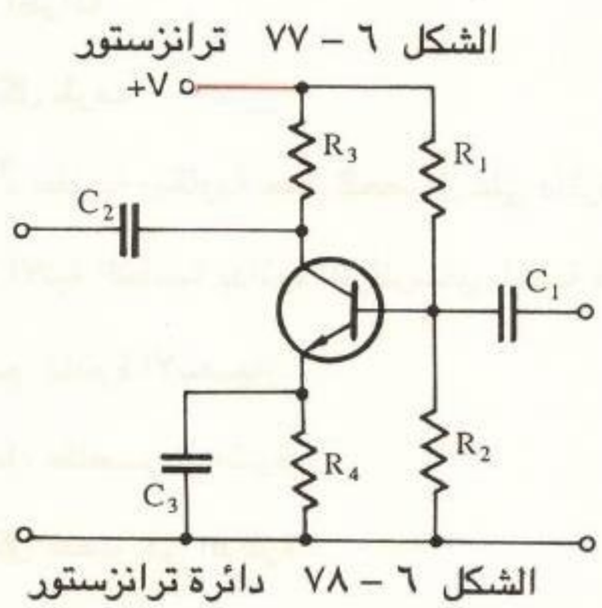
٥ – قارن بين دوائر مكبرات صنف (أ) وصنف (ب) وصنف (ج) .

٦ – اشرح وظيفة دائرة الازدواج .

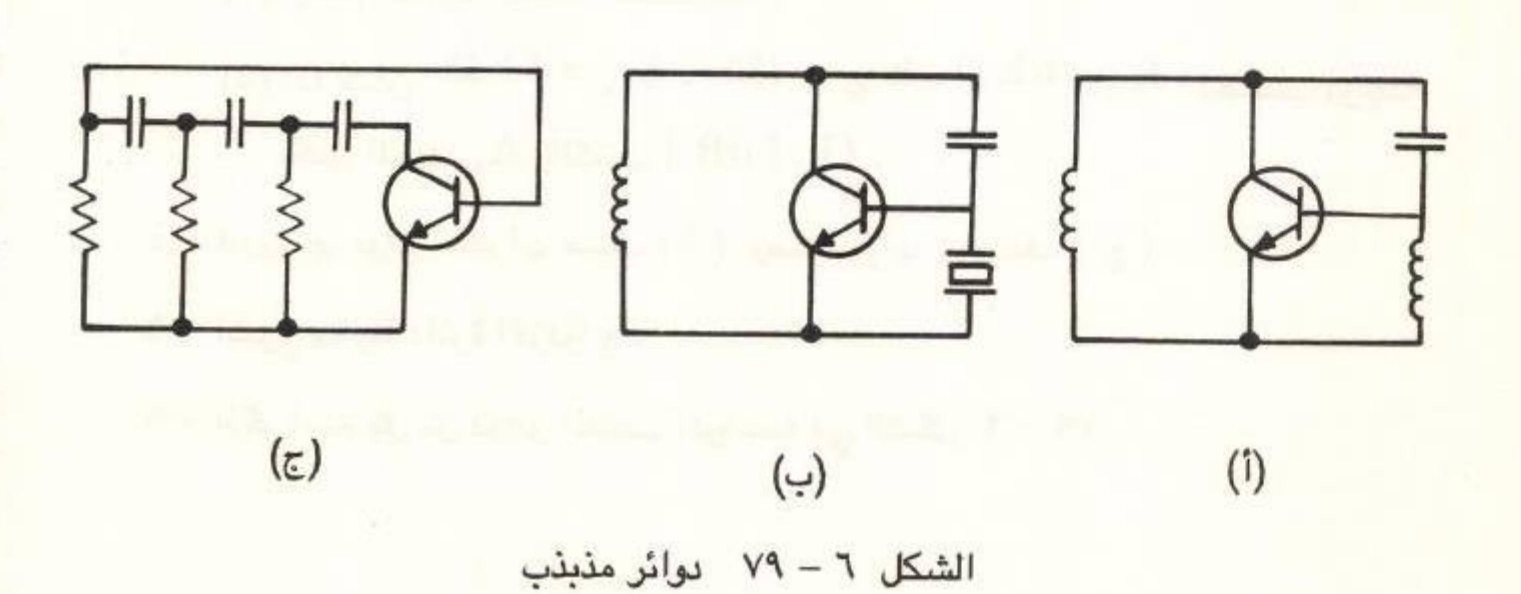
٧ – اذكر اسم كل من دوائر المذبذب الموضحة في الشكل ٦ – ٧٩ .



الشكل ٦ – ٧٧ ترانزستور



الشكل ٦ – ٧٨ دائرة ترانزستور



الشكل ٦ – ٧٩ دوائر مذبذب

٨ - اذكر استخدامات الأدوات شبه الموصلة الآتية :

(١) ثنائي منظم الجهد .

(٢) الثنائي الباعث للضوء .

(٣) ثنائي المكثف المتغير .

(٤) الثرميستور .

(٥) أداة هول .

(٦) الثايريستور .

٩ - اذكر أسماء أطراف ترانزستور تأثير المجال (FET) واشرح وظائف هذه الأطراف.

١٠ - أكمل جدول القيم المنطقية التالي :

الدخل		الخرج					
A	B	A.B	$\overline{B}$	A+B	$\overline{A}$	$\overline{A}.\overline{B}$	$\overline{A}+\overline{B}$
0	0						
0	1						
1	0						
1	1						

الفصل السابع
أساسيات التحكم الإلكترونى
Fundamentals of electronic control

تُستخدم أجهزة التحكم الإلكتروني المختلفة في كل الأجهزة ، مثل الإنسان الآلي وأدوات الماكينات في المصانع ، والغسالات الأتوماتيكية في المنازل والسيارات . ولهذا يمكن القول ان العصر الحالي هو عصر التحكم الإلكتروني ، وإنه من المتوقع في المستقبل أن يستمر هذا الاتجاه بقوة .

ويحتاج التحكم الإلكترونى إلى أجهزة إحساس بالضوء والحرارة ، ومحثات (مشغلات) للسولينويد المغناطيسية والمحركات ، ومواء مات في المحولات الرقمية / التمثيلية ودوائر التحويل من التوازى إلى التوالى ، وأنظمة التحكم على التوالي والتحكم بالتغذية الراجعة .

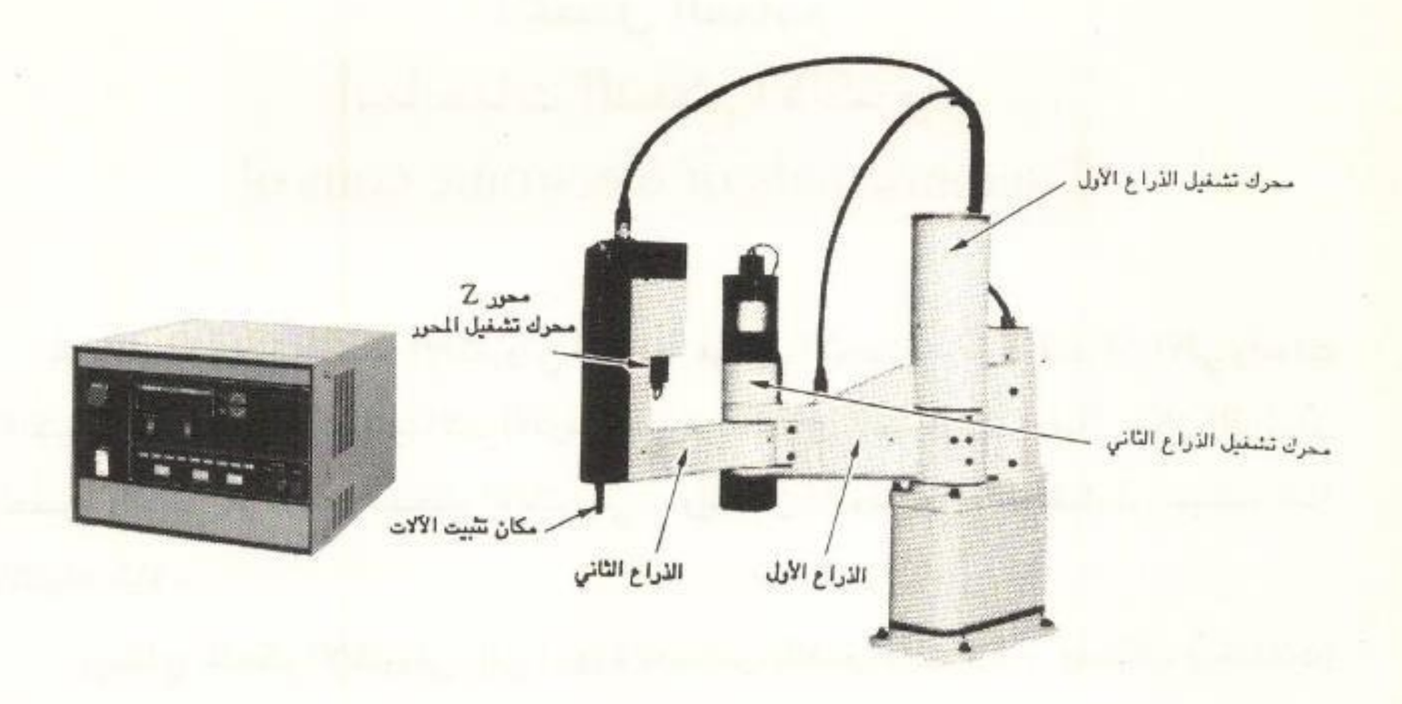
في هذا الفصل ، سندرس أساسيات طرق التحكم الإلكتروني، وكذلك الاستخدامات العملية لأنظمة التحكم الإلكتروني البسيطة .

٧ – ١ أنواع ومكونات أنظمة التحكم Control system

٧ – ١ – ١ تركيب أنظمة التحكم

يوضح الشكل ٧ – ١ مثالاً لإنسان آلي يستخدم للتجميع حيث يتم توصيل جهاز يتحكم في هذا الانسان الآلي عن طريق كابل ، وبعد تثبيت يد ماسكة إلى الإنسان الآلي ، يتم تحويل وإمداد الأجزاء وبعض الأعمال الأخرى أتوماتيكياً بواسطة الإنسان الآلي وذلك بإرسال إشارة من الحاسوب إلى المتحكم (جهاز التحكم).

بالإضافة إلى ذلك فإن توصيل كاميرا لاكتشاف الأشياء تجعل الإنسان الآلي يميز مكانها وشكلها .

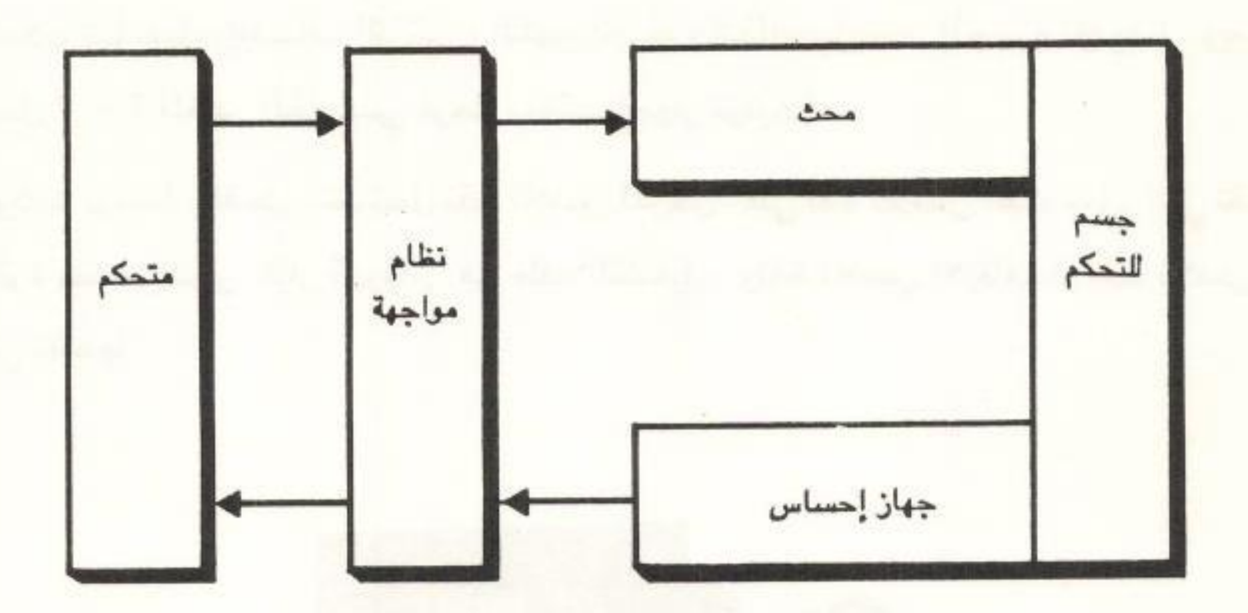


الشكل ٧ – ١ الإنسان الآلي

ويبين الشكل ٧ – ٢ العناصر الأساسية لتركيبات وأجهزة ضبط أتوماتيكية وكذلك للإنسان الآلي .

ويمكن لجهاز الإحساس أن يكتشف معلومات عن مكان الشيء وشكله ، وكذلك متغيرات طبيعية مثل الحرارة والضغط . والمتحكم هو جهاز يحلل المعلومات التى تم الحصول عليها بواسطة جهاز الإحساس ويرسل إشارات تحكم .

ونظام المواجهة Interface هو الجهاز الذي يتوسط في تحويل الاشارات التي تم الحصول عليها بواسطة جهاز الإحساس حتى يسهل على المتحكم معالجتها .



الشكل ٧ – ٢ مخطط صندوقي لنظام تحكم

أما المحث فهو جهاز يجعل الآلة تعمل لتمسك الشيء وتحمله بإشارة من المتحكم . ويدخل نظام المواجهة أيضاً بين المتحكم والمحث . وهناك حقائق كثيرة ونظريات سبق دراستها طبقت على أجهزة الإحساس وأجهزة التحكم والمحثات .

٧ – ١ – ٢ التحكم المتتابع Sequential control والتحكم بالتغذية الراجعة

التحكم يعنى تنفيذ عملية مطلوبة على أشياء معينة عند الضرورة. ولهذا الغرض ، فإن التحكم يشتمل على التحكم المتتابع الذي يحقق عمليات متوالية معينة، والتحكم بالتغذية الراجعة لتحقيق أشياء مرغوب فيها.

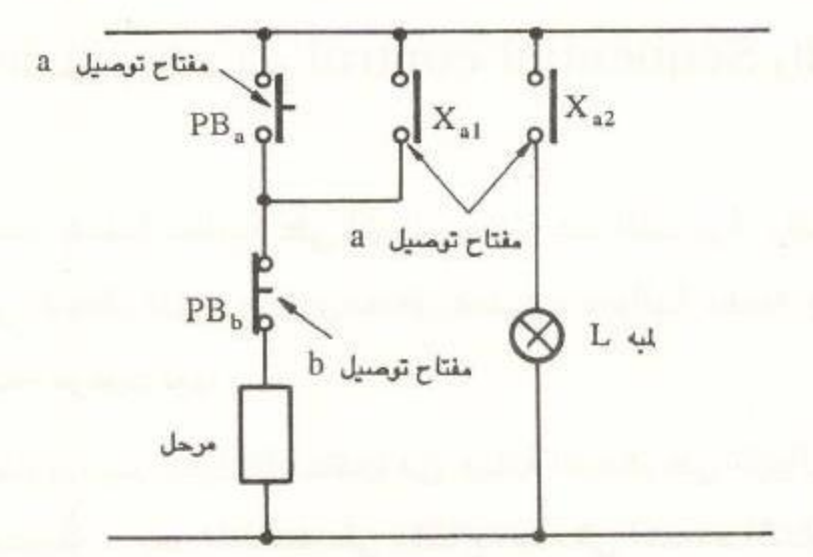
وفي التحكم المتتابع ، يتم تنفيذ كل خطوة من عملية التحكم على التوالي باتباع ترتيبات وشروط موضوعة مسبقاً . بعد الضغط على مفتاح البدء في التحكم المتتابع ، تعالج أجهزة التحكم كل الخطوات وفقا لإجراءات قد تعلمها الجهاز . وفى أجهزة التحكم ، تستخدم

مرحلات لتشغيل وإيقـــاف الدائـــرة الكهربائيـــة، وكـذلك مؤقتات (أجـهزة توقيت) . ويبين الشكل ٧ - ٣ المظهر الخارجـي لمرحل ومؤقت (جهاز توقيت).

وكمـا درسنا بالفـعل ، تشـتـمل نقط تلامس المرحل على نقط تلامس التشـغيل، التي تقـفل الدائرة عندما يسرى تيار كهربائى في ملف التشغيل، ونقط تلامس الايقاف أو نقط تلامس b التي تفتحها .



الشكل ٧-٣ المرحل (على اليسار) وجهاز التوقيت (على اليمين)

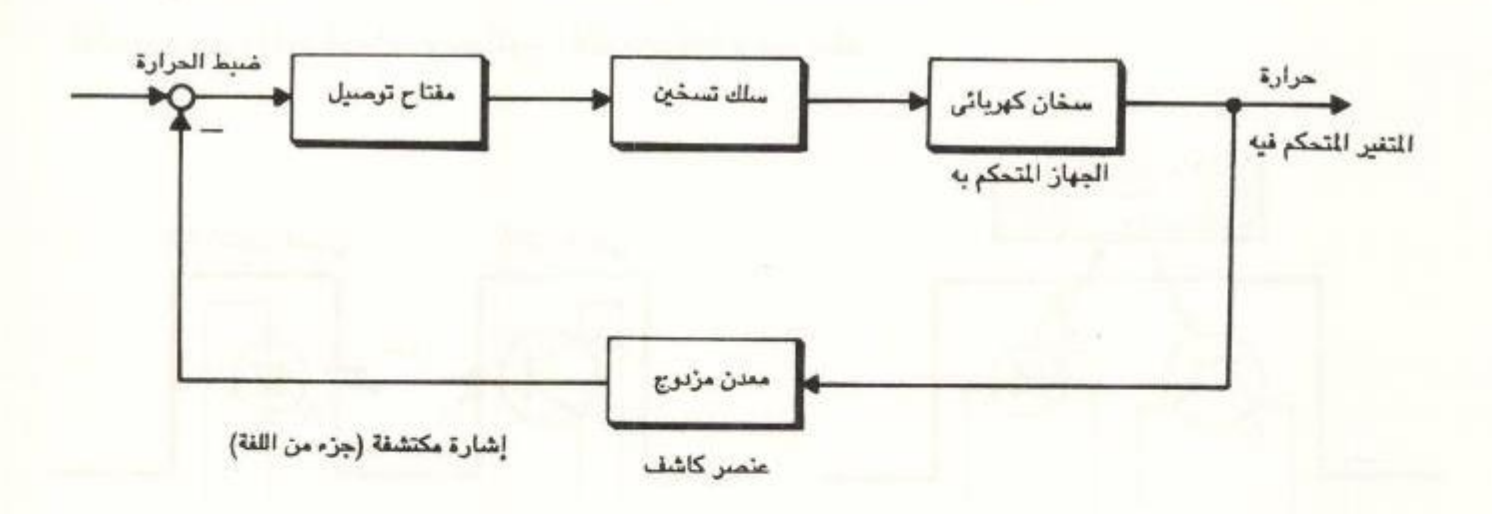


الشكل ٧-٤ دائرة مسك ذاتى Self holding circuit

ويبين الشكل ٧ – ٤ دائرة مسك ذاتى تستخدم كدائرة بدء لمحرك . عندما يضغط على زر الدفع PBa ، تضيء اللمبة L ، وتطفأ اللمبة بالضغط على PB_b .

وحالياً ، تستخدم مرحلات بدون نقط تلامس بصورة شائعة . وعلى الجانب الآخر ، يقارن التحكم بالتغذية الراجعة خرج الشيء بقيمة مرغوبة ويحاول أن يطابقهما .

كما يبين الشكل ٧ – ٥ تركيب تحكم الحرارة لسخان كهربائى كمثال على التحكم بالتغذية الراجعة . والمعدن المزدوج الذي سوف نتعرض له فيما بعد ، ينثنى ويفتح موصل دائرة سلك كهروحرارى عندما ترتفع درجة الحرارة ، والذي ينتج عنه عدم سريان تيار كهربائي إلى السلك الكهروحراري . وعندما تنخفض درجة الحرارة ، يقفل الموصل ، فينتج عنه سريان تيار كهربائي إلى السلك الكهروحرارى مرة أخرى . ولهذا ، فإنه في التحكم بالتغذية الراجعة يشاهد المتغير تحكم دائم أثناء عملية التحكم .



الشكل ٧ – ٥ المخطط الصندوقي لنظام تحكم بتغذية راجعة

٧ – ١ – ٣ المحس (جهاز الإحساس) Sensor

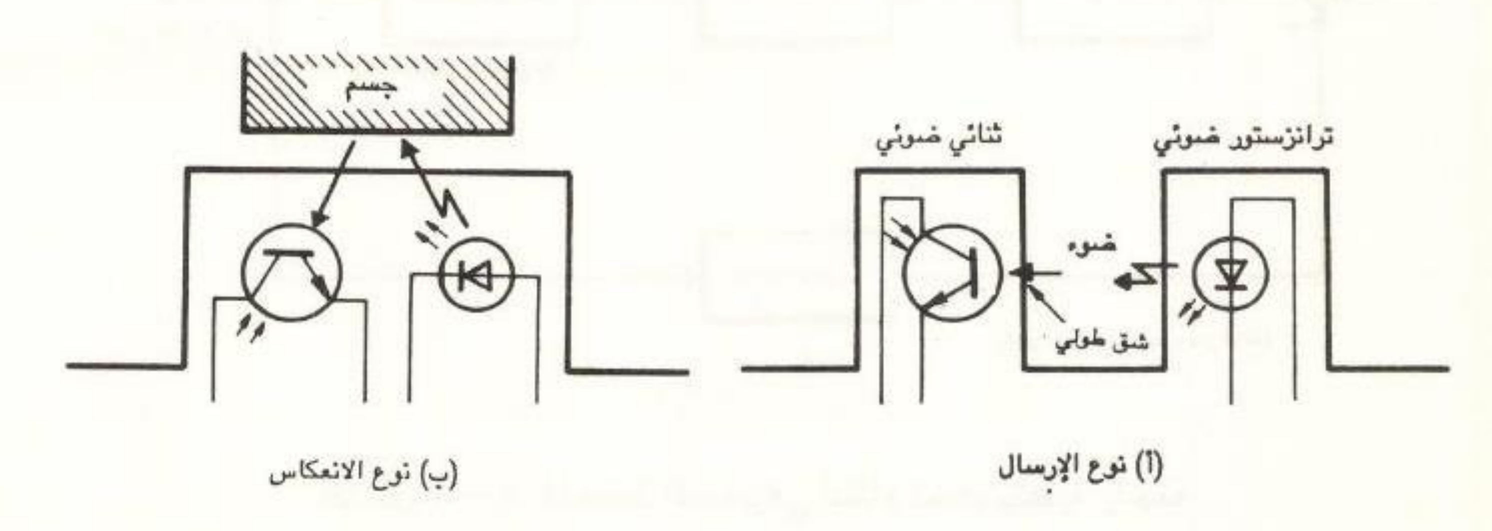
بالنسبة للمتحكم ، يستخدم جهاز إلكتروني مثل جهاز الحاسوب الصغير . ولهذا فإن المحسات المستخدمة يجب أن تكون هي تلك التي تحول المتغيرات الطبيعية إلى جهد كهربائي أو تلك التى تكتشف إما وجود إشارة كهربائية أو غيابها . وفيما يلي عرض لمحسات مختلفة .

أ – محس باستخدام الضوء (محس ضوئي) Sensor using light

إن تجميع الترانزستور الضوئى الذى يسرى فيه تيار كهربائى عند إشعاع الضوء وثنائي البعث الضوئى يسمح باكتشاف مرور واقتراب الشيء ، ويبين الشكل ٧ – ٦ مثالاً لذلك .

وفى الشكل ٧ – ٦ (أ) ينقطع الضوء عندما يمر شيء خلال شق طولي ليمنع سريان تيار مجمع الترانزستور . وفي الشكل ٧ – ٦ (ب) ، يسرى تيار مجمع الترانزستور بواسطة الضوء المنعكس على شيء مقترب .

وبالإضافة إلى ذلك ، هناك الثنائيات الضوئية وخلايا الجهد الضوئي وخلايا التوصيل الضوئي التي تقل مقاومتها بالضوء المشع . وتستخدم هذه الأنواع في الأبواب الأتوماتيكية للأتوبيسات والمصاعد ، والمفاتيح الأتوماتيكية وغير ذلك .

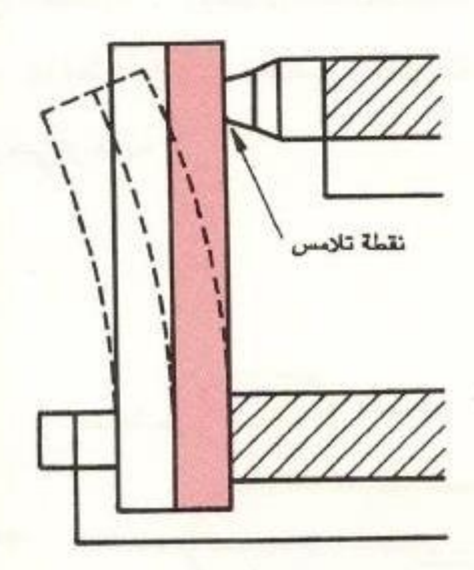


الشكل ٧–٦ المحسات باستخدام الضوء .

ب – محس الحرارة Temperature sensor

يستخدم الازدواج الحراري كمحس لدرجة الحرارة على أساس خاصية الزيادة في القوة الدافعة الكهروحرارية الناتجة من ارتفاع درجة الحرارة في نقط التلامس الساخنة .
الثرميستور الذى تقل مقاومته بارتفاع درجة الحرارة ، يستخدم كمحس لدرجة الحرارة .
ولهذا تضاف دائرة تعويض لأن المقاومة لا تقل خطيًا عما هي عليه .

وفى المعدن المزدوج المستخدم للتحكم في درجة حرارة السخان الكهربائي ، يلصق لوحين معدنيين لهما معاملات تمدد خطية مختلفة لتوصيل وفصل دائرة على أساس انثناء اللوحين المعدنيين وفقاً لارتفاع درجة الحرارة . ويبين الشكل ٧ – ٧ الشكل الرئيسى للمعدن المزدوج .
ويستخدم محس الحرارة لأغراض مختلفة منها على سبيل المثال تكييف الهواء وتنظيم درجة حرارة الفرن .



الشكل ٧ – ٧ المعدن المزدوج Bimetal

حـ – محس باستخدام المغناطيسية Sensor using magnetism

عنصر هول هو محس تمثيلى لاستخدام المغناطيسية . فعنصر هول هو جهاز شبه موصل مع تطبيق ظاهرة توليد الجهد الكهربائى في اتجاه عمودي على كل من التيار والمجال

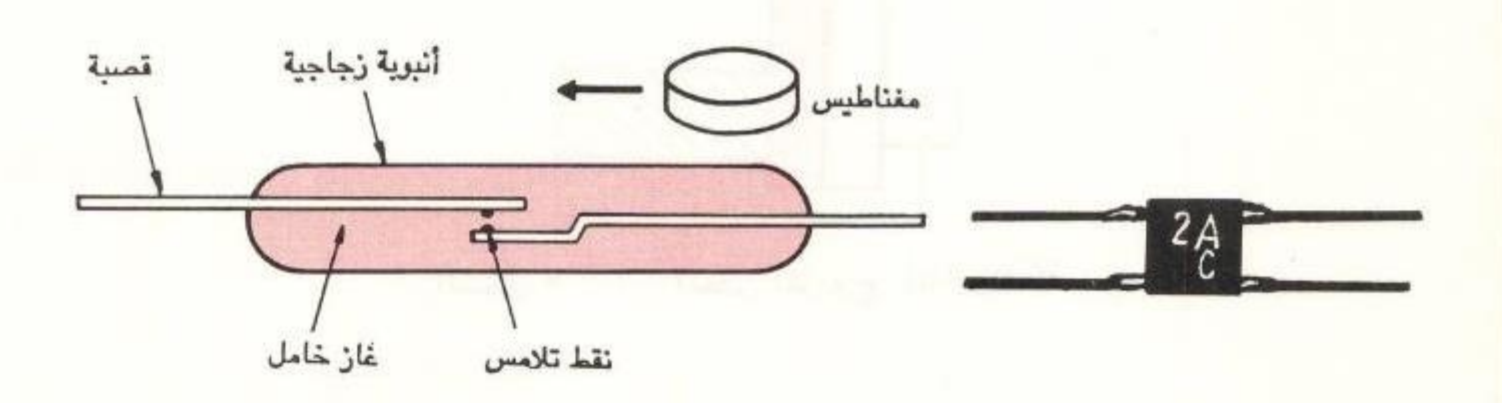
المغناطيسي. وعندما يسري تيار في موصل، ويسلط مجال مغناطيسى عمودي على التيار ؛ فإن جهد الخرج من عنصر هول يكون عدة عشرات الميللى ڤولت، ويعبر عنه بالمعادلة الآتية :

$$V_H = kIB\ [V]$$

حيث k : ثابت و I هو شدة التيار ، و B { تسلا T } هو كثافة تدفق المجال المغناطيسي .

وفي عنصر هول ، يتناسب جهد الخرج مع كثافة التدفق المغناطيسية B ، ويستخدم العنصر في أجهزة قياس التدفق المغناطيسى وبتجميعه مع مغناطيس يستخدم في اكتشاف مواقع الاشياء .

كما يستخدم مفتاح القصبة بتجميعه مع مغناطيس غالباً لاكتشاف إقتراب الشيء . و يبين الشكل ٧ – ٩ تركيب مفتاح القصبة . ويحدث تمغنط لنقط التلامس باقتراب مغناطيس ، وتقفل الدائرة بالقوة الجاذبة . ونقط التلامس المتميزة بالمرونة تغلق وتفتح لحظياً (عدة ميللى ثانية) بمجال مغناطيسي خارجي وبدونه .

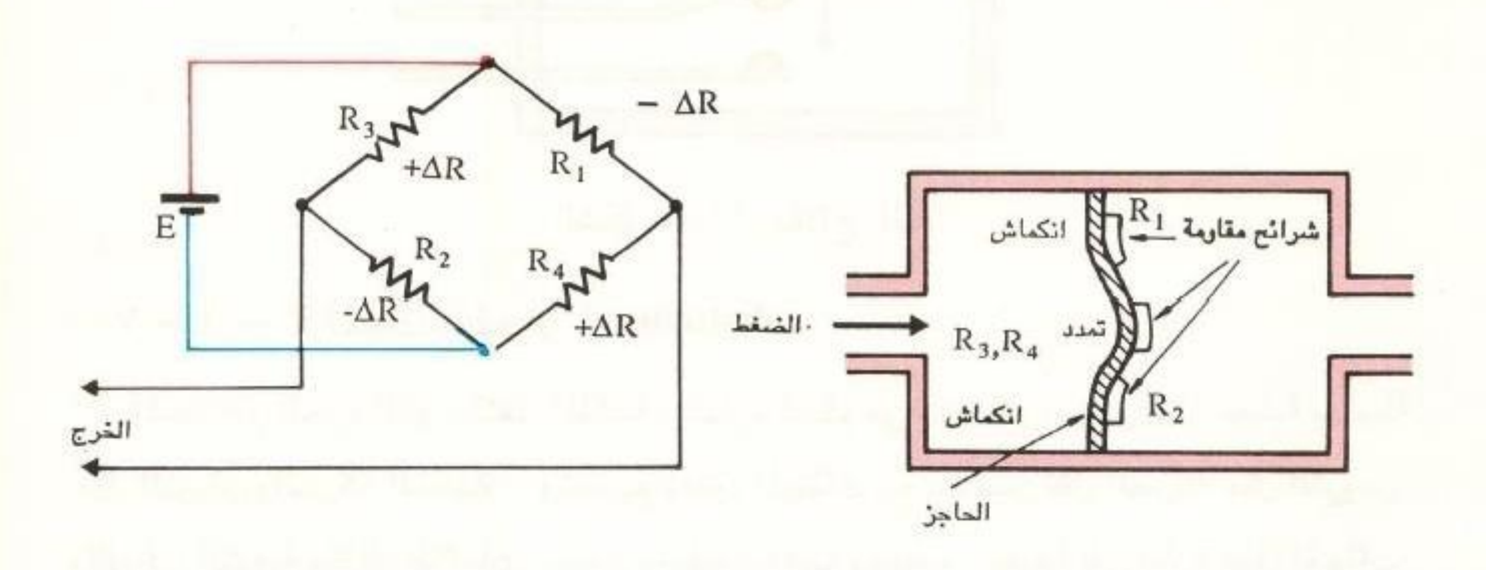


الشكل ٧ –٩ مفتاح القصبة

الشكل ٧–٨ عنصر هول

د – محس الضغط Pressure sensor

لكي يكتشف محس الضغط ضغط الهواء ، وضغط الزيت، وغير ذلك ؛ فإنه يستخدم غالبًا مقياس ضغط سلكى . ويبين الشكل ٧–١٠ الفكرة الأساسية لمحس ضغط من نوع مقياس الضغط السلكى . كما يوضح الشكل أن تسليط الضغط يجعل الحاجز الملتصق بشريحة مقاومة يتشوه ليغير قيمة المقاومة للشريحة نفسها . ثم تكتشف هذه المقاومة باستخدام دائرة القنطرة المبينة في الشكل ٧–١٠ (ب) وتؤخذ كجهد كهربائى .



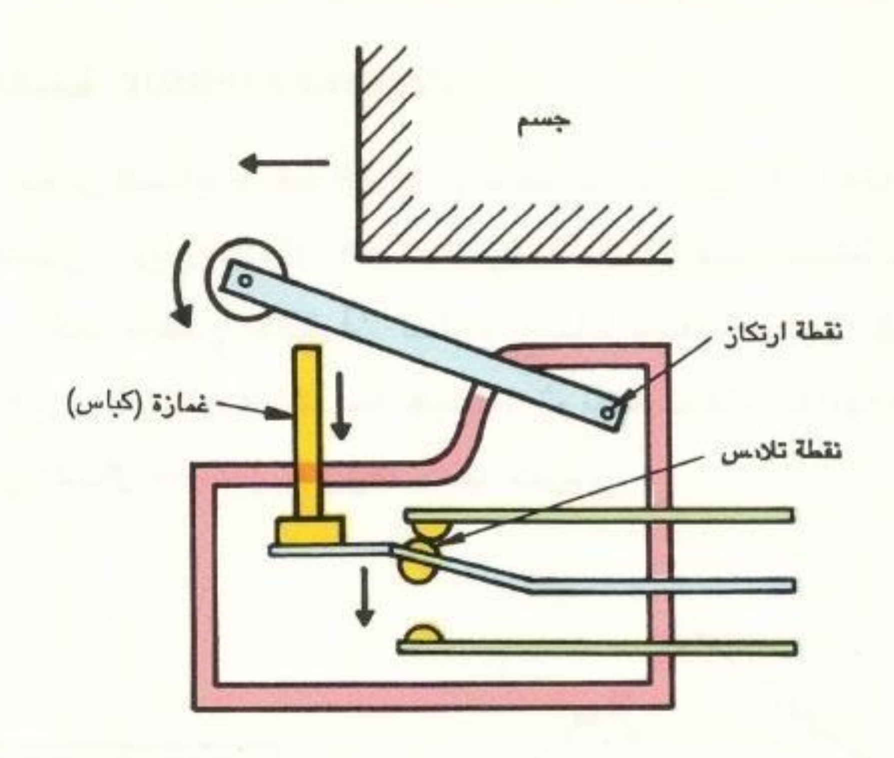
ب – الدائرة

أ – مبدأ العمل

الشكل ٧–١٠ محس الضغط

هـ – مفتاح الحد Limit switch

مفتاح الحد الذى يعمل بالتلامس مع شيء يستخدم ككاشف في دوائر الحماية . ويبين الشكل ٧–١١ فكرته الأساسية ؛ فالتلامس مع الشيء يجعل الغمازة تنزل لأسفل لتغير وضع نقط التلامس الدقيقة ، التى لها آلية تأثير خطافي .



الشكل ٧-١١ مفتاح الحد

٧ - ١ - ٤ المحث (المحُفز) Actuator

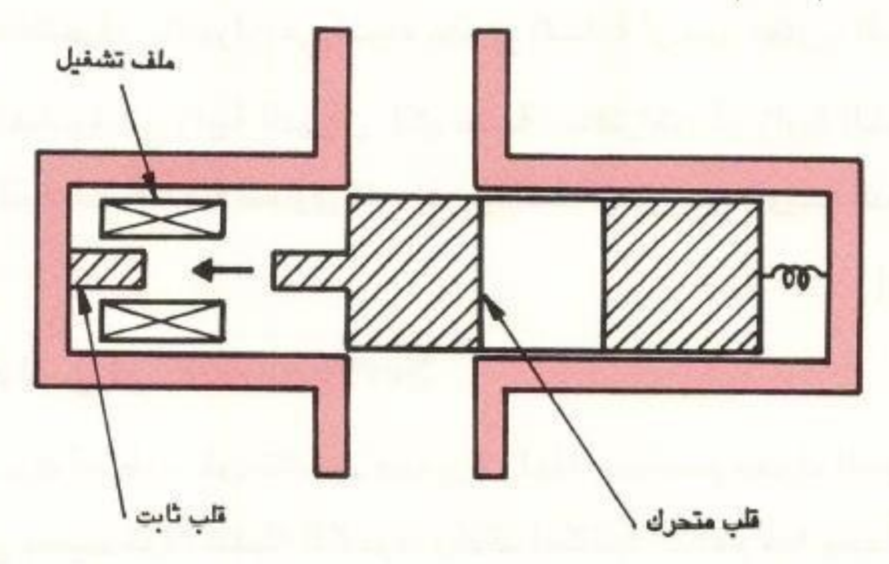
المحث هو الجزء الذى يشغل الماكينة بإشارة تحكم من المتحكم . وهو ينفذ عملية بسيطة مثل الدوران والحركة الخطية . وتجميع بعض المحثات مع عناصر نقل الحركة مثل التروس واللوالب الكروية وكذلك الكامات تسمح بعمليات دقيقة ومعقدة . وفيما يلي فكرة عمل المحثات شائعة الاستخدام .

أ - السولينويد (الملف اللولبي) Solenoid

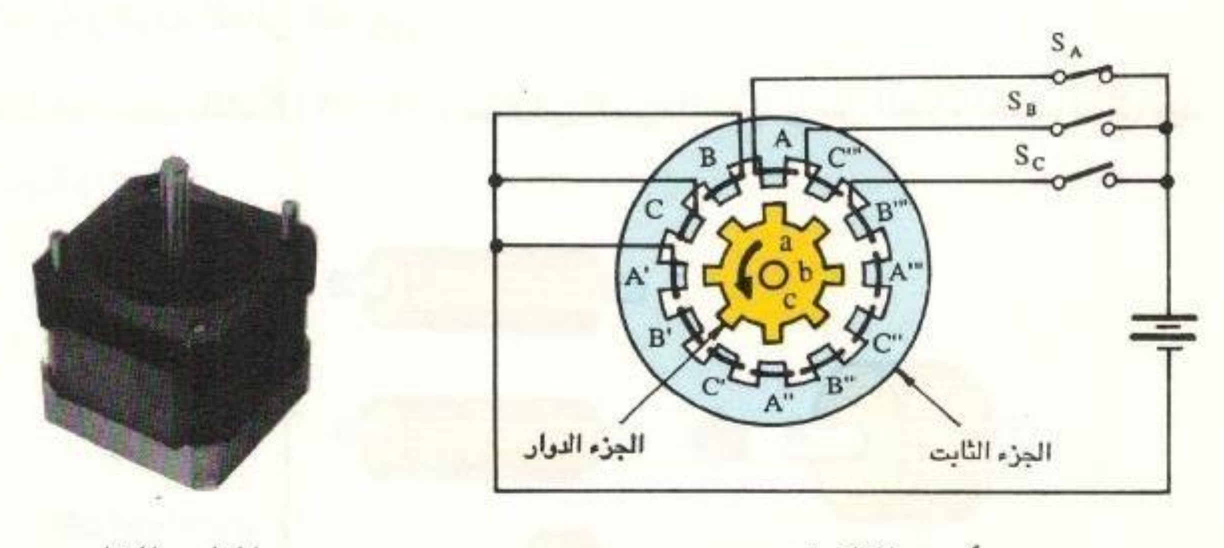
يستخدم السولينويد فعل الجاذبية لمغناطيس كهربائى موضوع أمام شريحة حديدية . ويمكن استخدام قوة جذب المغناطيسات الكهربائية مباشرة . بالإضافة إلى ذلك ، وكما هو مبين فى الشكل ٧-١٢ ، فإن السولينويد يستخدم غالبًا في دائرة ضغط الهواء أو الزيت . ويؤدي السولينويد حركة تبادلية فقط بين نقطتين وينقصه التحكم في السرعة ، ومع ذلك فالسولينويد واسع الانتشار لأنه رخيص .

ب - المحرك النبضى Pulse motor

المحرك الذي يدور بقوة كهرومغناطيسية يستخدم بكثرة في المحثات . ويحتاج المحرك الذى يستخدم في المحثات إلى تحكم دقيق في الدوران وله مواصفات مختلفة بالمقارنة بمحركات القدرة ذات الاستخدام العام .



الشكل ٧-١٢ السولينويد (الملف اللولبي)



أ - الفكرة ب - المظهر الخارجى

الشكل ٧-١٣ المحرك النبضى

المحرك النبضي أو المحرك ذو الخطوة يدور بزاوية معينة ، على سبيل المثال 1.8 درجة ، مع كل نبضة ترسل . والشكل ٧-١٣ (أ) يوضح الفكرة الأساسية ، فعندما يسري التيار الكهربائي في لفات الجزء الثابت C , B , A واحدة بعد الأخرى ، يسحب قطب الجزء المتحرك ليدور في اتجاه السهم المبين بالشكل زاوية ثابتة كل مرة ، ويسمح تغيير ترتيب التيار المار في لفات الجزء المتحرك بالدوران في اتجاه عقارب الساعة أو ضد عقارب الساعة .

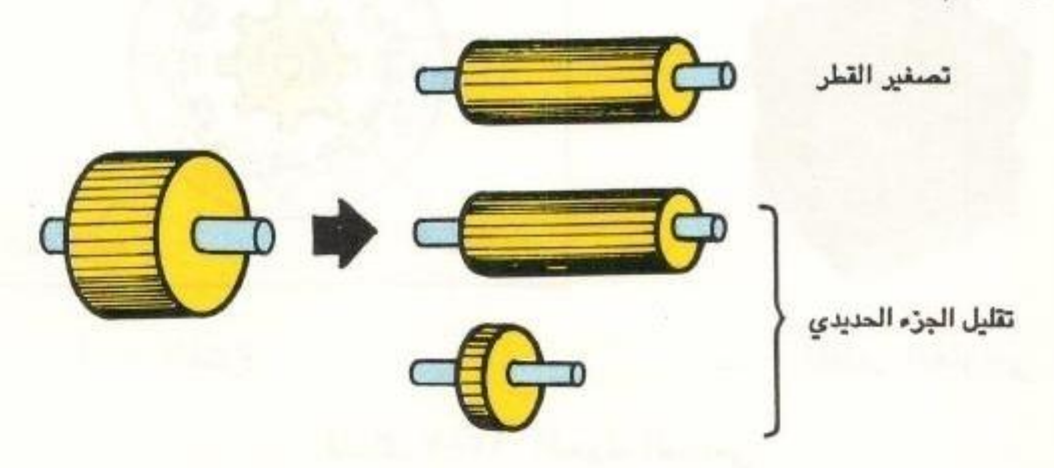
وزاوية الخطوة هي زاوية الدوران لكل نبضة ؛ بافتراض أن زاوية الخطوة هى A^{o} لكل نبضة ، وعدد النبضات الداخلة تساوى n ، إذن يمكننا التعبير عن زاوية الدوران θ بالعلاقة:

$$\theta = A_n \, [o]$$

حـ - محرك السيرفو Servomotor

حيث إن لمحرك الخطوة قوة تشغيل صغيرة ، لهذا يستخدم محرك السيرفو في الإنسان الآلي الصناعي بسبب قوة تشغيله الكبيرة، وكذلك إمكانية التحكم فيه جيداً . وأساس عمله مثل أساس عمل المحرك العام . إلا أنه قد أدخلت تحسينات لتناسب التحكم بدقة عالية والسرعة العالية والتردد العالى كما يلي :

١ - كما هو مبين بالشكل ٧ - ١٤ ، يخفض الجزء الحديدى من الجزء المتحرك لتزويد العجلة والإعاقة .



الشكل ٧-١٤ كيفية تحسين معدل العجلة

٢ – يخفض عدد اللفات لتحسين الاستجابة .

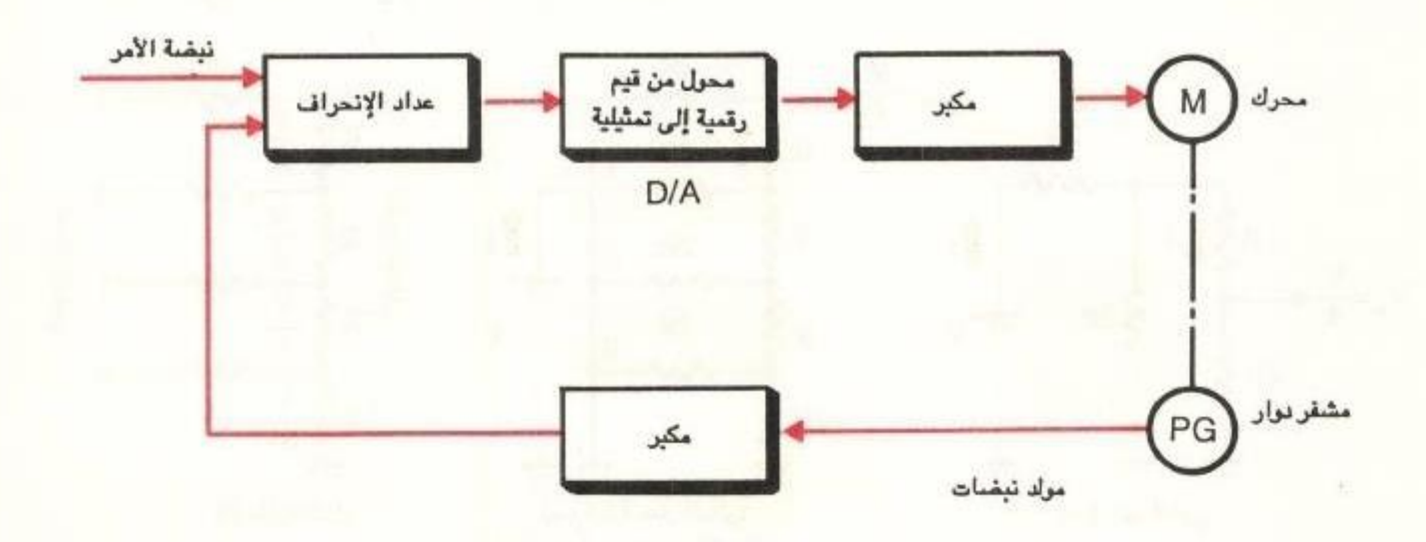
٣ – استخدام قلب حديدي ذي خاصية تشبع مغناطيسي عالية لتزويد الخرج .

٤ – كما هو مبين بالشكل ٧–١٥ ، يعطى الذراع المتحرك فتحات مائلة لإزالة العزم غير المنتظم .

ويمكن إدارة محركات السيرفو بزاوية موجهة (نبضة) فقط بواسطة تثبيت مكتشف زاوية الدوران المسمى بالمشفر الدوار إلى محور الجزء المتحرك للمحرك . ويبين الشكل ٧–١٦ مثالاً لميكانيكية السيرفو .



الشكل ٧–١٥ الفتحات المائلة



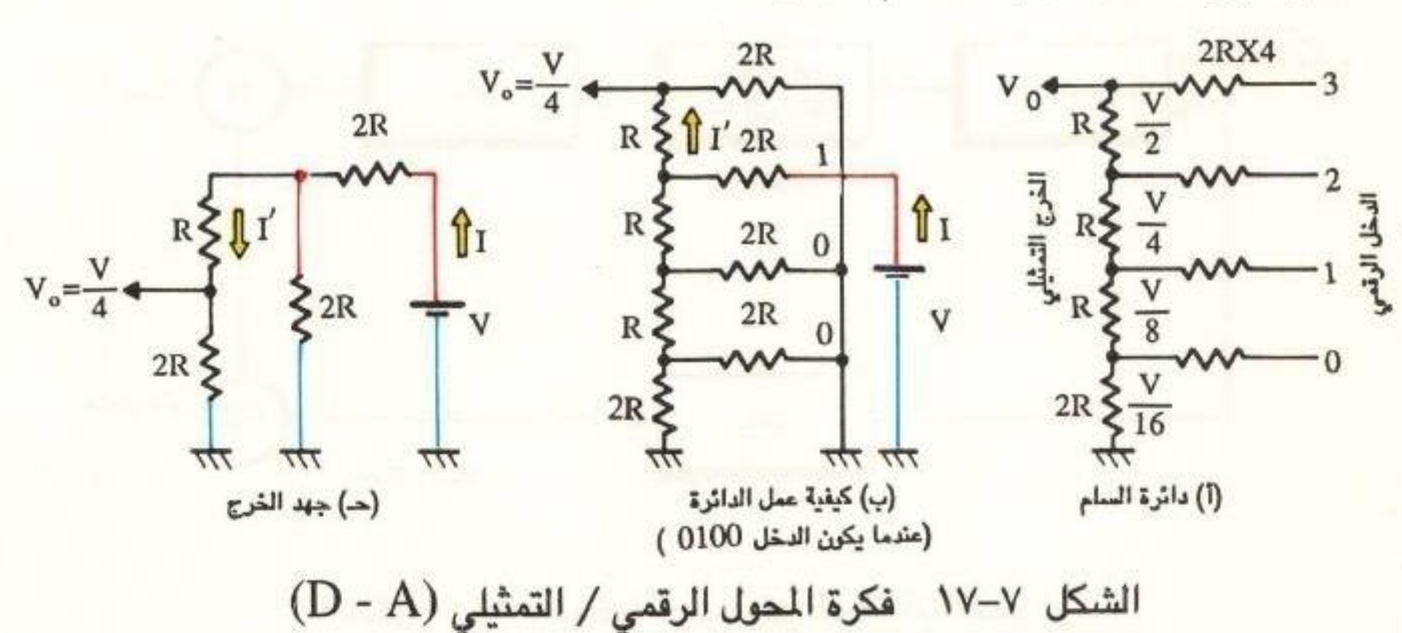
الشكل ٧–١٦ المخطط الصندوقي لميكانيكية السيرفو

تتكامل النبضات في عداد الانحراف بعد وصول نبضة الأمر . وتحول النبضة المتكاملة إلى جهد كهربائي مستمر بواسطة المحول الرقمي / التمثيلي لتكبيرها وتضاف إلى المحرك . يولد دوران المحرك نبضات مع المشفر الدوار المثبت في المحور الدوار للمحرك . تطرح هذه النبضات النبضة المتكاملة في عداد الانحراف ، عندما يصبح عدد النبضات صفراً ، ويقف دوران المحرك .

٧ - ١ - ٥ نظام المواجهة Interface

على الرغم من أن المحس ينتج جهداً كهربائيًا صغيراً جداً ، فإن المحثات المشغلة تحتاج لتيار كبير . والمتحكم شائع الاستخدام هو متحكم رقمى، يحتاج إلى ميكروكمبيوتر ذى كفاءة من 4 إلى 16 رقم ثنائى . هنا 5 ڤولت و 0 ڤولت تناظر "1" و "0" فى الأرقام الثنائية . لهذا، فنظام المواجهة التي تشتمل على التحويل المتبادل تركب في نظام التحكم الإلكتروني وذلك من أجل الربط السهل بين الوحدات . ونظام المواجهة هى مجموعة من الدوائر الكهربائية والأجهزة المركبة للتنظيم بين نظامين أو أكثر .

وفيما يلى الدوائر الرئيسة لنظام المواجهة .



الشكل ٧-١٧ فكرة المحول الرقمي / التمثيلي (D - A)

أ - المحول الرقمي / التمثيلي (D - A) D - A Converter

المحول الرقمي / التمثيلي هو دائرة لتحويل الإشارات الرقمية من "1" و "0" إلى جهد كهربائي ذات قيمة مستمرة متغيرة ويبين الشكل ٧-١٧ الفكرة الرئيسية للمحول الرقمي التمثيلي (D - A) . ودائرة تقسيم الجهد من نوع المقاومة المبينة في الشكل ٧-١٧ تسمى دائرة السلم وتستخدم في المحول الرقمي / التمثيلي ذي الأرقام الأربعة الثنائية . والدوائر المبينة في الأشكال ٧-١٧ (ب) ، (جـ) مبنية على أساس إشارة رقمية (0100).
ويحسب جهد الخرج كمايلي :

المقاومة الكلية

$$R_0 = 2R + \frac{6R^2}{5R} = \frac{16R}{5}$$

التيار الكلى :

$$I = \frac{V}{R_0} = \frac{5V}{16R}$$

تيار الخرج

$$I' = I \times \frac{2R}{5R} = \frac{V}{8R}$$

جهد الخرج :

$$V_0 = I' \times 2R = \frac{V}{4}$$

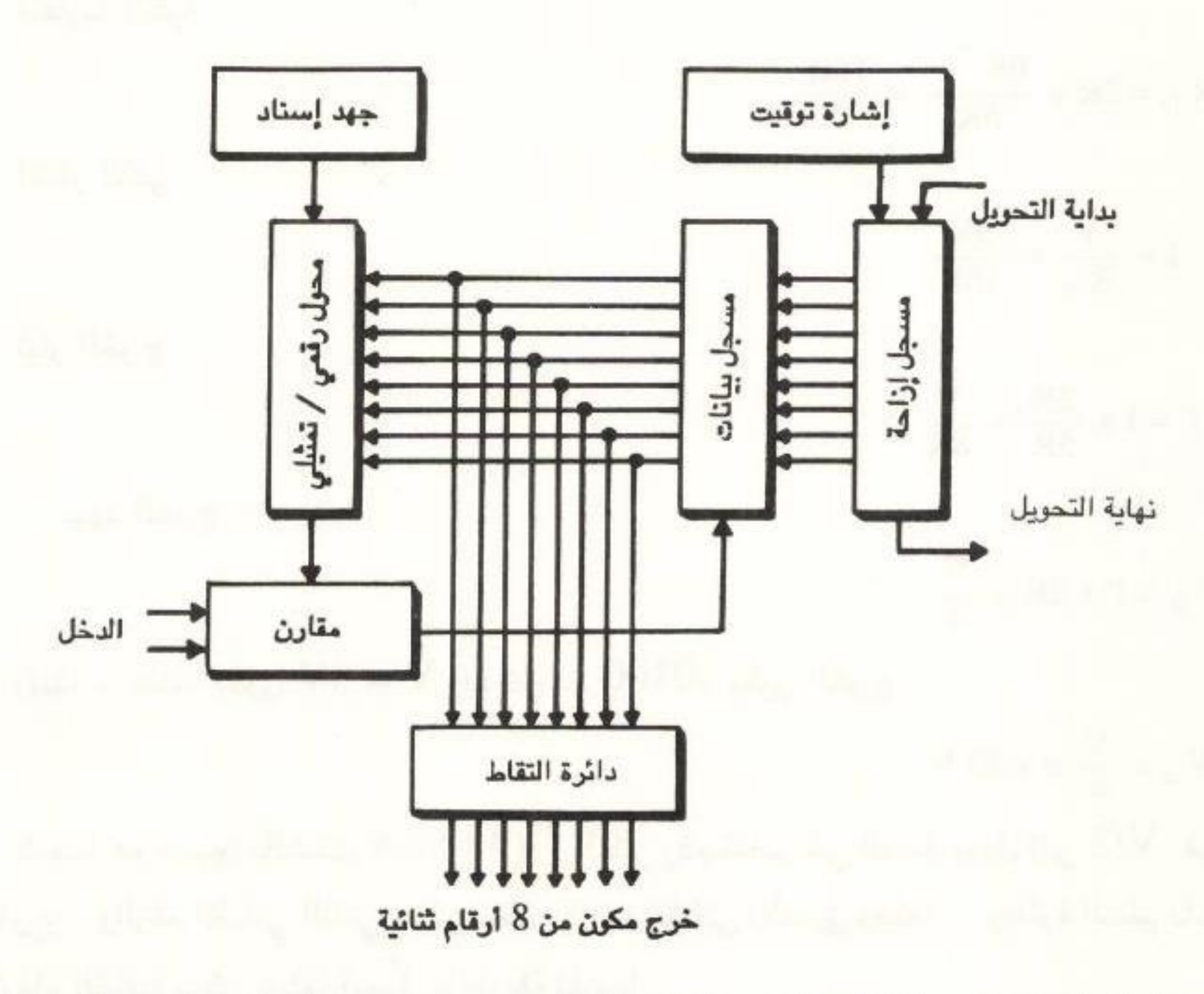
ولهذا ، عندما يكون $V = 5V$ والدخل هو 0100، يكون الخرج

$$V_0 = \frac{V}{4} = 1.25 \text{ V}$$

كما هو مبين بالشكل ٧-١٧ (أ) ، أعلى رقم ثنائى في الدخل يؤول إلى V/2 فى الخرج ، والرقم الثنائي الثاني يعطي نصف الرقم الثنائى الأسبق وهكذا . ودائرة السلم ذات الأرقام الثنائية يمكن عملها أيضاً بالطريقة نفسها .

ب – المحول التمثيلي / الرقمي (A - D) A - D Converter

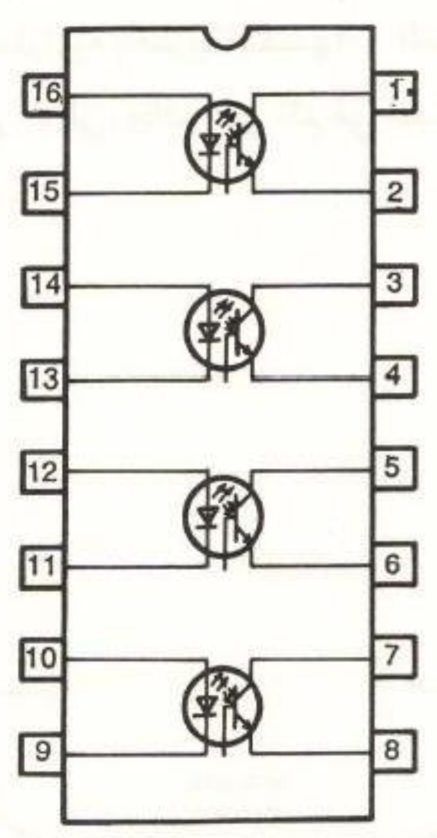
المحول التمثيلي / الرقمي هو دائرة لتحويل الجهد الكهربائى الناتج من محس إلى متغير رقمي مكون من أرقام ثنائية . بالوجود مع محول رقمي / تمثيلي ، صنعت الدائرة المبينة في الشكل ٧–١٨ في دائرة متكاملة . ويسلط الجهد التمثيلي من المحول الرقمي / التمثيلي إلى المقارن حتى يصبح الجهد التمثيلي مساوياً لجهد الدخل . وفي هذه اللحظة تؤخذ الإشارة الرقمية لتعمل التحويل من تمثيلي إلى رقمي . المحول التمثيلي / الرقمي ذو الأرقام الـ8 يمكنه فصل جهد الدخل إلى 256 نوعًا من الإشارة الرقمية .



الشكل ٧–١٨ التركيب الداخلى لدائرة متكاملة (IC) مستخدمة للتحويل التمثيلي/الرقمي (A-D)

حـ - نظام مواجهة معزول

في نظام المواجهة المعزول ، تحول الإشارة الكهربائية إلى الضوء باستخدام ثنائى باعث للضوء ، ثم يستقبل الضوء بواسطة ترانزستور ضوئي، ويحول إلى إشارة كهربائية مرة أخرى للإرسال . وحيث إن الدخل والخرج معزولان كهربائيًا للحماية من زيادة الجهد ، فإن نظام المواجهة المعزول هذا شائع الاستخدام في أجهزة التحكم . ويبين الشكل ٧-١٩ مثالاً يسمى الرابط الضوئي .



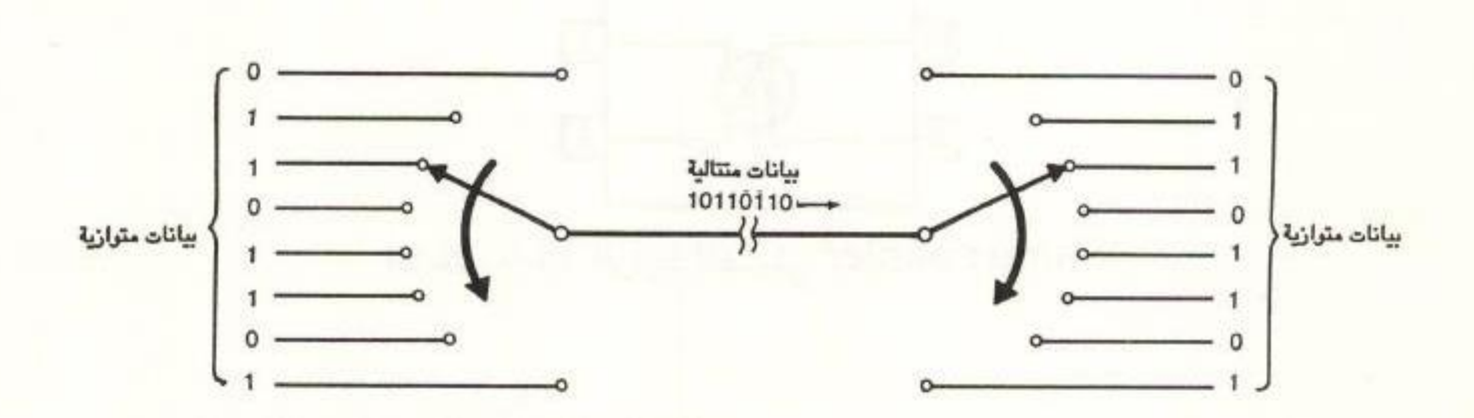
الشكل ٧-١٩ الرابط الضوئي Photo coupler

د - دائرة التحويل من التوازى إلى التوالي

فى الحاسوب الصغير المستخدم للمتحكم ، تعالج إشارات الأرقام الثنائية على التوازى ، بينما يستخدم في الخطوط التلفونية سلكان لإرسال واستقبال الإشارات، وحتى يكون إرسال

وإستقبال إشارات الحاسوب باستخدام الخطوط التلفونية ممكناً ، يحتاج الأمر إلى دائرة لتحويل الإشارات المتوازية إلى إشارات متتالية بالتبادل ، وتسمى هذه الدائرة بدائرة التحويل من التوازى إلى التوالى وتصنع كدائرة متكاملة . ويبين الشكل ٧-٢٠ الفكرة الأساسية لها .

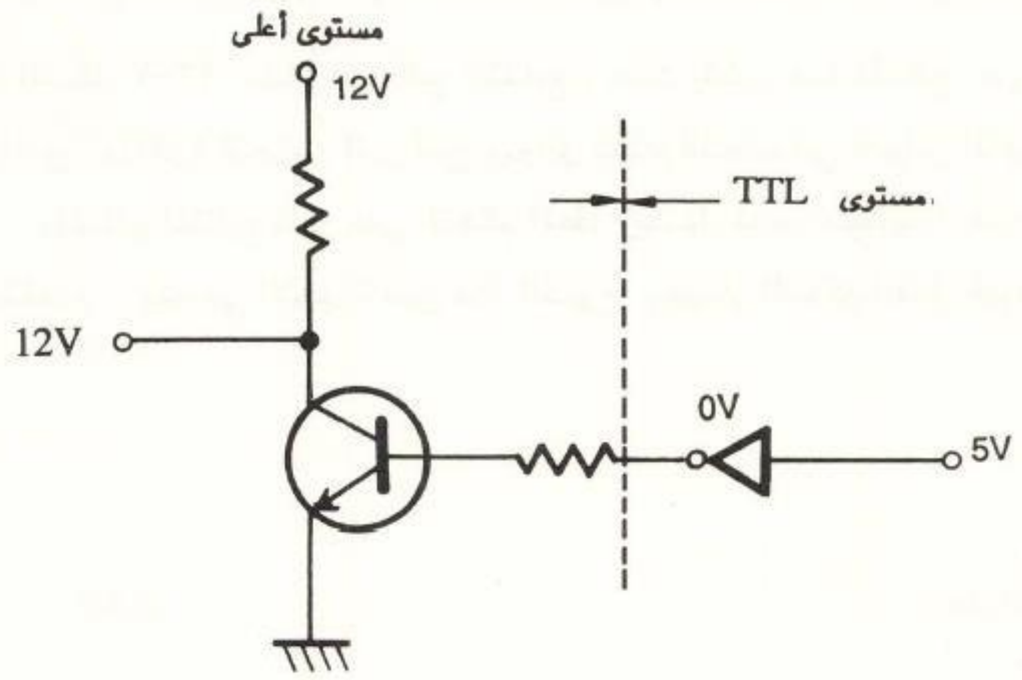
فى الشكل ٧-٢٠ ، عندما يدور المفتاحان على اليسار وعلى اليمين بالسرعة نفسها تصبح البيانات المتوازنة المكونة من 8 أرقام ثنائية على الجانب الأيسر بيانات متتالية مبينة في منتصف الشكل وذلك بتأثير تغيير التوصيل . وعلى الجانب الآخر ، تحول البيانات المتتالية في الجانب الأيمن إلى بيانات متوازية بالطريقة نفسها . العملية التى تتم في الجانب الأيسر تسمى التحويل من توازى إلى توالي، وتلك التى تتم في الجانب الأيمن تسمى التحويل من توالي إلى توازي .



الشكل ٧-٢٠ التحويل من توازي إلى توالي

هـ - تحويل مستوى الإشارة Signal level conversion

عندما يكون مستوى الجهد الكهربائى للمتحكم 5 فولت و 0 فولت ، فإن التوصيل إلى جهاز آخر ذي مستوى جهد كهربائي مختلف يحتاج إلى دائرة نظام مواجهة لتحويل مستوى الإشارة .



الشكل ٧-٢١ تحويل مستوى الإشارة

ويبين الشكل ٧-٢١ مثالاً لنظام المواجهة للتحويل إلى مستوى جهد أعلى . وكما يتبين من الشكل ، فإن إشارة الدخل وهى 5 فولت تصبح (صفراً) فولت عندما تخرج من دائرة NOT ، وذلك يمنع مرور التيار إلى الترانزستور فيسمح بأخذ 12 فولت في الخرج .

٧ - ٢ التحكم الإلكترونى العملى

الحواسيب والمعالجات المتتابعة تستخدم لتشغيل أجهزة التحكم الإلكترونية . وفي هذا البند، نقوم بشرح المعالج المتتابع الذى يسهل تداوله ويشيع استخدامه في المصانع.

٧ – ٢ – ١ المعالج المتتابع Sequencer

التحكم بالحاسوب لايسمح بفهم لغة الحاسوب واستخدام نظام المواجهة بصورة تامة . ولهذا تم اختراع وتطوير المعالجات المتتابعة للتحكم في أجهزة الحاسوب بواسطة أوامر تحكم بسيطة . والمعالج المتتابع عبارة عن متحكم قابل للبرمجة يستخدم عملياً في المصانع .

ويبين الشكل ٧–٢٢ مثالاً للمعالج المتتابع ، حيث يتكون هذا المعالج من محمل برنامج لعمل برنامج ، وذاكرة لتخزين البرنامج، ودوائر تحكم للتحكم في الدوائر الكهربائية بواسطة الذاكرة . والمعالج المتتابع قادر على التحكم المعقد ويسهل تغيير محتوياته وهو واسع الانتشار في الاستخدام . وتسمى الأجهزة من هذا النوع بجهاز التحكم القابل للبرمجة (PC).



الشكل ٧–٢٢ المعالج المتتابع

تمارين

١ – اشرح عمل العناصر الآتية المكونة لنظام التحكم :

– المحس　　　– المحث (المشغل)　　　– نظام المواجهة

٢ – اذكر نوعين من المحسات باستخدام الضوء واشرح طريقة عملهما .

٣ – اشرح استخدام وعمل مفتاح القصبة .

٤ – إختار عبارة من المجموعة ب لها علاقة بالعبارة المقدمة في المجموعة أ :

مجموعة أ	مجموعة ب
١ – محس يستخدم الضوء	أ – الحاجز
٢ – محس درجة الحرارة	ب – مفتاح الحد
٣ – محس يستخدم المغناطيسية	جـ – المرحل
٤ – محس الضغط	د – ترانزستور ضوئى
٥ – محس لاكتشاف التلامس	هـ – دائرة السلم
٦ – المحول الرقمي / التمثيلي	و – محرك السرفو
٧ – نظام مواجهة معزول	ز – الرابط الضوئى
٨ – التحكم المتتابع	ح – المعدن المزدوج
٩ – التحكم بالتغذية الراجعة	ط – عنصر هول

٥ – احسب زاوية الخطوة لمحرك نبضى يدور 180 درجة في كل 100 نبضة .

٦ – على فرض أن 500 نبضة سلطت على محرك نبضى له زاوية خطوة 0.9 درجة احسب زاوية الدوران للمحرك .

٧ – اشرح عمل نظام المواجهة المعزول .

٨ – اشرح الفرق بين التحكم المتتابع والتحكم بالتغذية الراجعة .

٩ – اشرح مميزات المعالج المتتابع .

الحمد لله تعالى الذي تتم بنعمه الصالحات
لقد وفقت بتصوير النسخة اسكنر بصورة جديده
وطباعة ممتازة
نسألكم الدعاء بظهر الغيب لي ولوالدي
اخوكم في الله أبو عبد الله عبد المهيمن فوزي

الفصل الثامن

أجهزة القياس الكهربائية
Electric Instrumentation

أغلب الظواهر الكهربائية ظواهر غير مرئية ولذلك فإن أجهزة القياس الكهربائى مثل مقياس الجهد (Voltmeter)، ومقياس التيار (Ammeter) ومقياس القدرة (Wattmeter) تستخدم في الدراسة الكمية للظواهر الكهربائية ومتابعة عمل الأجهزة الكهربائية والإلكترونية .

وفى هذا الفصل سنتناول أولاً دراسة الوحدات ، والمواصفات واستخدام القيم المقاسة الضرورية لقياس المتغيرات الكهربائية، كما سندرس مبادئ عمل وتركيب وقياس بعض الأمثلة النموذجية لأجهزة القياس الكهربائية وأدوات ملاحظة الموجات .

٨ – ١ معالجة ومعايير القيم المقاسة

٨ – ١ – ١ القياس والعيارية Measurement and standard

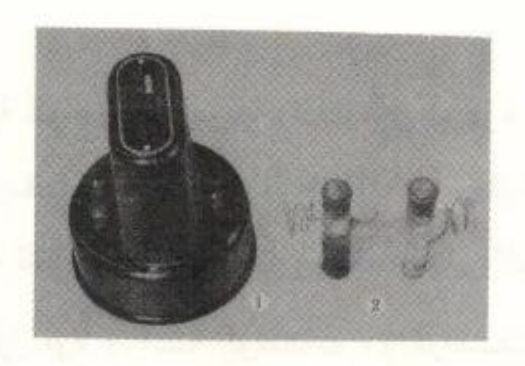
إن قياس الطول يعني تقدير الطول كمضاعفات لوحدة قياس الطول أى المتر (m) وهذا التعريف يمكن تطبيقه أيضاً على الكميات الطبيعية الأخرى .

وتصمم القياسات المعيارية الطبيعية على أساس النظام المتري وفقا للاتفاقيات العالمية .



الشكل ٨ – ١ المقاومة القياسية

الجزء 2 يكون
داخل الجزء 1



الشكل ٨ – ٢ البطارية القياسية

وتعرف الوحدات الأخرى باستخدام بعض الوحدات الأساسية ، كوحدة قياس كمية الكهرباء (C) 1 التي تعرف بحاصل ضرب التيار في الزمن كالآتي :

$$1\ [A]\ x\ 1[s] = 1[A.s]$$

في الأجهزة الكهربائية التى تستخدم في قياس الكميات الطبيعية المرتبطة بالكهرباء يجب أن تكون دقة القياس طبقًا للمواصفات القياسية .

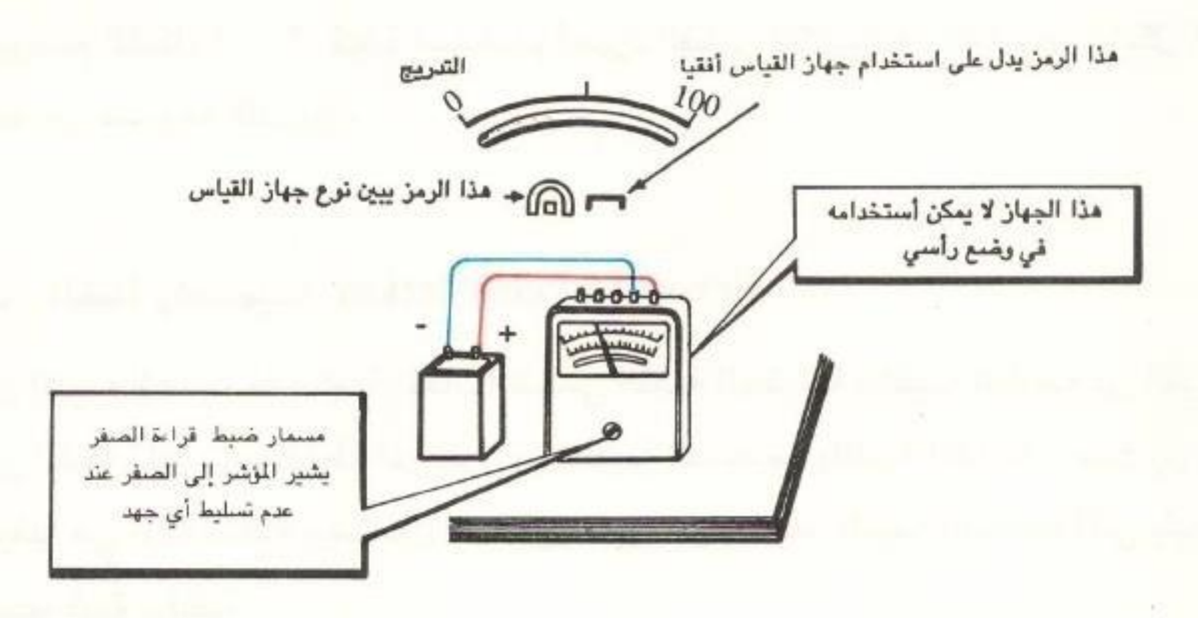
كما أن المعايير القياسية تشمل المقاومة القياسية لقياس المقاومة ، والبطارية القياسية لقياس الجهد والملف القياسى لقياس المحاثة، وأيضًا المكثف القياسي لقياس السعة الكهروستاتيكية .

ويبين الشكل ٨ – ١ نموذج لمقاومة قياسية في حين يوضح الشكل ٨ – ٢ المظهر الداخلي للبطارية القياسية .

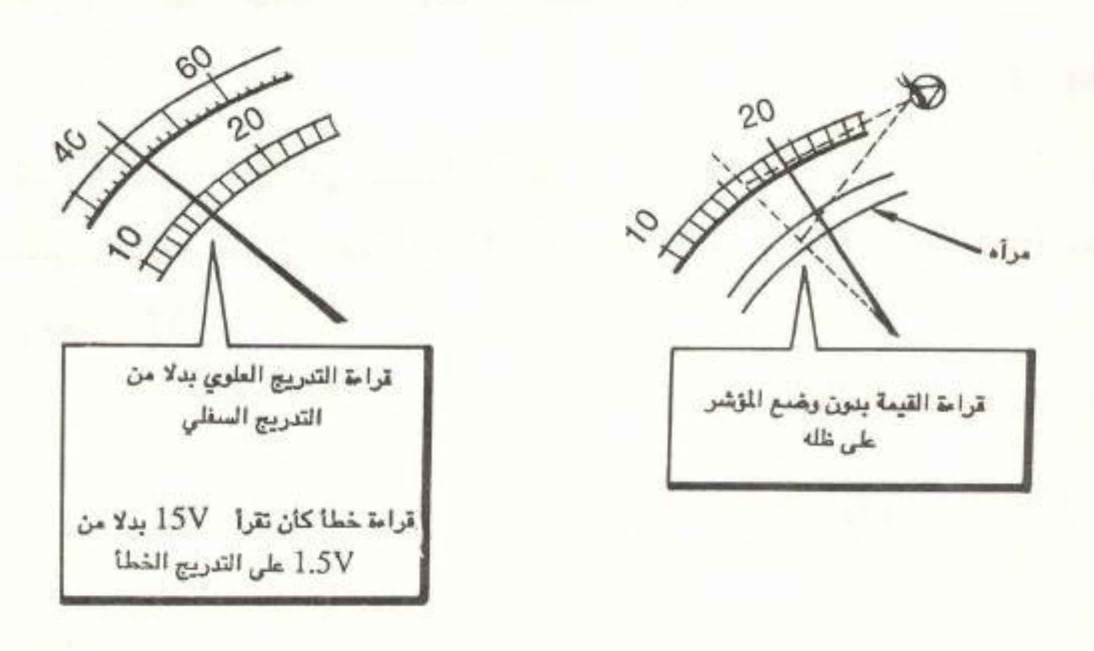
فالقوة الدافعة الكهربائية للبطارية القياسية عند $20^{o}C$ (عشرون درجة مئوية) على سبيل المثال تكافئ 1.01864V

٨ – ١ – ٢ معالجة القيم المقاسة Handling of measured values

فى هذا الفصل ، تتركز الدراسة على المصطلحات الفنية ووسائل تداول المقادير المقاسة التي تستخدم على نطاق واسع في القياسات الكهربائية .



الشكل ٨ – ٣ استخدام غير صحيح فى استعمال أجهزة القياس



الشكل ٨ – ٤ قراءة غير صحيحة للقيمة المقاسة

أ – الخطـــأ Mistake

عدم دقة عامل التشغيل غير المقصودة، في قراءة القيمة المقاسة يسمى خطأ . ويجب أن يتدرب عمال التشغيل كل يوم على استخدام أجهزة القياس وقراءة التدريج .

ويوضح الشكل ٨ – ٣ كيفية استخدام أجهزة القياس الكهربائية . كما يبين الشكل ٨ – ٤ قراءة غير صحيحة للتدريج .

ب – الخطأ وتصحيحه Error and correction

إن القيمة الصحيحة للكمية المقاسة تسمى القيمة الحقيقية والقيمة الناتجة من القياسات تسمى القيمة المقاسة، والخطأ هو الفرق بين القيمة الصحيحة والقيمة المقاسة ، حيث إن القيمة الحقيقية هي قيمة مثالية ويستحيل الحصول عليها . ولهذا تعدّ القيمة القياسية التى يثبت أنها صحيحه قيمة حقيقية .

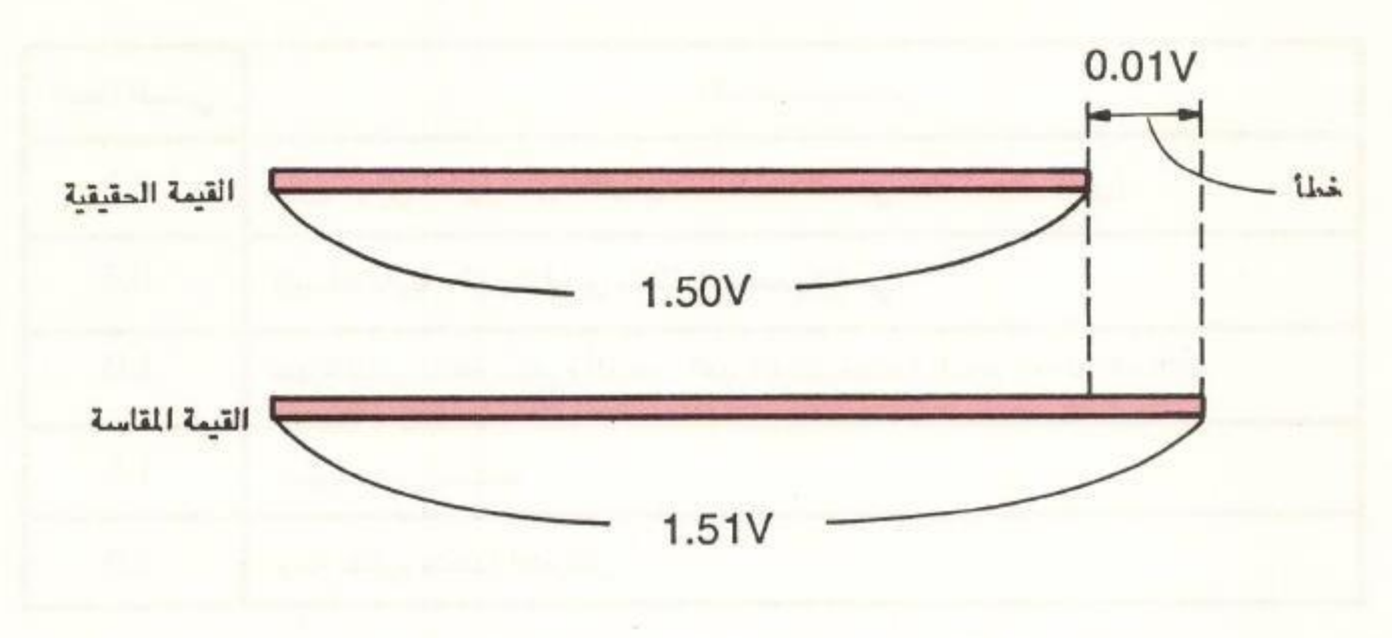
وبافتراض أن القيمة المقاسة M والقيمة الحقيقية T فإن الخطأ $\in$ يكتب كالآتي :

$$\in = M - T \qquad (8-1)$$

وتكون نسبة الخطأ $\frac{\in}{T}$ هى نسبة الخطأ $\in$ إلى القيمة الحقيقية والنسبة المئوية لهذه النسبة تسمى بالخطأ المئوى . ومن الشكل ٨ – ٥، T= 1.50V , M = 1. 51V وهكذا فإن الخطأ $\in$ يحسب كالآتي :

$$\in = 1.51 - 1.50 = 0.01 \text{ V}$$

$$\frac{\in}{T} = \frac{0.01}{1.50} = 0.0067 = 0.67 \%$$



الشكل ٨ – ٥ القيمة الحقيقية والقيمة المقاسة

إن الفرق بين القيمة المقاسة والقيمة الحقيقية تسمى تصحيح α والنسبة α / M تسمى نسبة التصحيح ، وكذلك النسبة المئوية لهذه النسبة تسمى التصحيح المئوى .

ويعبر عن قيمة التصحيح α بالمعادلة الآتية :

$$\alpha = T - M \qquad (8-2)$$

حـ - خطأ أجهزة القياس

إن بيان جهاز القياس لا يمكن بالضرورة أن يظهر القيمة الحقيقية بدقة . وتصنف أجهزة القياس ذات المؤشر كما هو بالجدول ٨ – ١ على أساس مدى الخطأ المسموح وباستخدام الجدول نجد أن جهاز القياس الكهربائي تصنيف 0.5 يعطى خطأ أقل من 0.5 % من أقصى تدريج في كل جزء من التدريج .

الاستخـــــــــدام	الخطأ النسبي
قياس عياري لمعايرة أجهزة القياس ذات الخطأ النسبي 0.2 (معيار ثانوي)	0.2
قياسات دقيقة . أجهزة قياس متنقلة ذات حجم قياسي	0.5
أجهزة قياس متنقلة صغيرة الحجم . أجهزة قياس ضخمة الحجم ذات لوحة مفاتيح	1.0
أجهزة قياس للصناعة	1.5
لوحة مفاتيح متعددة الاغراض	2.5

الجدول ٨ – ١ تصنيف أجهزة القياس الكهربائية ذات المؤشر بالنسبة للخطأ النسبي

في جهاز قياس الجهد (الفولتميتر) تصنيف 0.5 وأقصى قيمة للتدريج له 100V يكون الخطأ اقل من 0.5 V لأي جزء من التدريج .

د – العمليات الحسابية

تقدر المقاومة بقياس الجهد والتيار ، وفي هذه الحالة يجب تقريب النتيجة لأقرب رقم ذى معنى . مثال لذلك عند حساب قيمة مقاومة باستخدام أجهزة قياس الجهد والتيار تصنيف 0.5 فتعطي المقاومة بـ $R = 96.419\ \Omega$ من القيم : $I = 0.782\ A\ ,\ V = 75.4\ V$ ولكن بما أن أجهزة القياس تسمح بنسبة مئوية للخطأ 0.5 % لذلك فإن التقريب لأقرب ثلاثة أرقام يكون كافٍ ، وهو ما يجعل قيمة المقاومة $96.4\ \Omega$

وعملية التقريب هي تلك العملية التي تقوم بتقريب العدد إلى أقرب عدد مكون من n من الأرقام بعد العلامة العشرية . ومثال لذلك إذا كانت قيمة الحد (n+1) أقل من 5 فإنها تهمل

أما إذا كانت أكبر من 5 فيقرب إلى الوحدة الأعلى . وفى حالة أن تكون قيمة العدد عند رقم الوحدة (n + 1) مساوية 5 فإن هذا الرقم يهمل عندما تكون n عدداً زوجياً ويقرب عندما تكون n عدداً فردياً .

هـ - الدقة والحساسية Precision and sensitivity

تعرف الدقة في القراءات بأنها درجة انحراف أو قرب القيمة المقاسة للقيمة الصحيحة .

مثال لذلك بالنسبة للقيمة المقاسة 1 v ودرجة الدقة في القياس 2mv فهذا يعني أن الخطأ $\pm$ 2mv أو أقل بين القيمة المقاسة والقيمة الحقيقية .

وتعرف الدقة بأنها درجة تجميع القيم المقاسة في قياسات متكررة . و الحساسية تعرف بأنها أقل كمية قياس يمكن أن تكتشف بالقيمة المقاسة أو هي النسبة بين تغير البيان وتغير الكمية المقاسة . ومن الاجهزة عالية الحساسية هي تلك التي تعطي زاوية دوران كبيرة مع اقل كمية مقاسة .

٨ - ٢ أجهزة القياس الكهربائية Electric measuring instruments

٨ - ٢ - ١ أنواع أجهزة القياس الكهربائية

تقوم القياسات الكهربائية بقياس الكميات الطبيعية باستخدام الطاقة الكهربائية .
وأجهزة القياس الكهربائية هى تلك الأجهزة التى تستخدم في عملية القياسات الكهربائية .

وتشمل أجهزة القياس الكهربائية أجهزة القياس التي تبين مباشرة المتغيرات الكهربائية وأجهزة الرؤية الكهربائية التي تكتشف الجهد أو التيار، والأجهزة التى تقوم بالقياس عن طريق اجراء عمليات مختلفة .

أجهزة الرؤية الكهربائية تتكون من جلفانومترات وأجهزة قياس كهربائية وهذه الأخيرة تتضمن القناطر والمقاومات المتغيرة ورواسم الذبذبات .

وتقسم أجهزة القياس الكهربائية إلى أجهزة تمثيلية وأجهزة رقمية طبقًا لنظام المبينات المستخدم .

جهاز القياس	الكمية المراد قياسها	أمثلة
أجهزة قياس ذات مؤشر .	تبين الكمية الكهربائية مباشرة .	جهاز قياس الجهد، جهاز قياس التيار، جهاز قياس القدرة، جهاز قياس التردد .
أجهزة تسجيل القراءات .	تسجل الكمية الكهربائية المتغيرة .	أجهزة تسجيل القراءات .
أجهزة قياس متكاملة .	تُجمل الكمية الكهربائية خلال فترة محددة .	جهاز قياس الوات ساعة جهاز قياس الأمبير ساعة

الجدول ٨ – ٢ تصنيف اجهزة القياسات الكهربائية

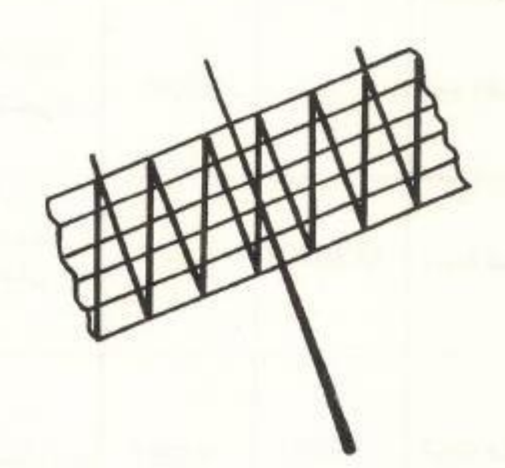
وتنقسم أجهزة القياس الكهربائية إلى أجهزة بيان القراءة ، أجهزة تسجيل وأجهزة قياس متكاملة كما هو مبين بالجدول ٨ – ٢ .

٨ – ٢ – ٢ اجهزة البيان Indicating instruments

توجد أنواع مختلفة من أجهزة البيان لإظهار القراءات المباشرة للمتغيرات الكهربائية مثل الجهد والتيار . وفى هذا البند ، تعامل أجهزة الملف المتحرك كأساس لأجهزة القياس للتيار الثابت لفهم نظرية عمل أجهزة القياس الكهربائية . بعد ذلك سوف ندرس أجهزة القياس الرقمية التي تظهر القيمة المقاسة على شكل أرقام من ناحية التركيب والخواص .

أ – انواع أجهزة القياس الكهربائية ذات المؤشر المتحرك Pointer - type

سوف نحلل هنا أجهزة القياس ذات المؤشر المستخدمة بكثرة في أجهزة القياس المباشرة ، وتسمى أجهزة القياس ذات المؤشر « بالأجهزة التمثيلية » ، التي تختلف عن أجهزة القياس الرقمية التي سوف تدرس بعد ذلك . ويقوم جهاز القياس نو المؤشر بقياس المتغيرات الكهربائية بواسطة انحراف المؤشر على تدريج قياس .



(أ) تصنيف 0.2



(ب) تصنيف 0.5

الشكل ٨ – ٦ أمثلة للتدريج

والرموز المبينة على تدريج جهاز القياس هي رموز خاصة بنوع جهاز القياس ورمز خاص بوضع الجهاز أثناء القياس .

كما أن رموز النوع الموضحة بالجدول ٨ – ٣ تصنف على أساس نظام العمل لأجهزة القياس ذات المؤشر . وفهم نظام العمل لكل نوع من أجهزة القياس ذات المؤشر له أهمية كبيرة لأن كل نوع له استخداماته تبعاً لنظرية عمله . كما أن الرموز الخاصة بدائرة الاستعمال المناسبة وكذلك الخاصة بوضع الجهاز أثناء الاستخدام موضحة بالجدولين ٨ – ٤ و ٨ – ٥ .

النوع	الرمز	نظام العمل	مثال	الدائرة المستخدمة	القراءة بالجهاز AC
ملف متحرك		(١) تستخدم القوة الكهرومغناطيسية بين المجال المغناطيسي لمغناطيس دائم والتيار المار في ملف	$VA\Omega\phi$	DC	—
مقوم التيار		(٢) مكونة من مقوم التيار مع جهاز قياس نوع ملف متحرك	VA	AC	قيمة متوسطة
نوع كهروحراري	تسخين مباشر	(٣) مكونة من ازدواج حراري وجهاز قياس نوع ملف متحرك	VAW	AC/DC (DC)	قيمة فعالة
ملف متحرك		(٤) تستخدم القوة الكهرومغناطيسية لمغناطيس متحرك موضوع في مجال مغناطيسي	VA	AC/(DC)	قيمة فعالة
دينامومتر كهربائي	محور هوائي	(٥) تستخدم القوة الكهرومغناطيسية بين التيارات المارة داخل الملفات	VAWf	AC/DC	قيمة فعالة
نوع حثي		(٦) تستخدم القوة الكهرومغناطيسية بين مجال مغناطيسي متغير وتيار متولد بالمجال المغناطيسي	VAWh	AC	قيمة فعالة
نوع كهرو ستاتيكي		(٧) استخدام القوة الكهروستاتيكية بين الاقطاب المشحونة	V	AC/DC	قيمة فعالة
نوع الريشة الرنانة		(٨) استخدام الرنين الميكانيكي للريش الرنانة	f	AC	—

V: فولتميتر A: اميتر W: قياس القدره Ω: جهاز قياس الاوم ϕ: فيض مغناطيسي f: جهاز قياس التردد w.h: جهاز قياس وات ساعة

الجدول ٨ – ٣ تقسيم اجهزة القياس ذات المؤشر على اساس نظام العمل

الرمز	الدائرة
—	DC
∼	AC
≂	DC/AC
≈	جهد متغير ثلاثي الأوجه متوازن
≋	جهد متغير ثلاثي الأوجه غير متوازن

الجدول ٨ – ٤ رموز دائرة الاستعمال المناسبة

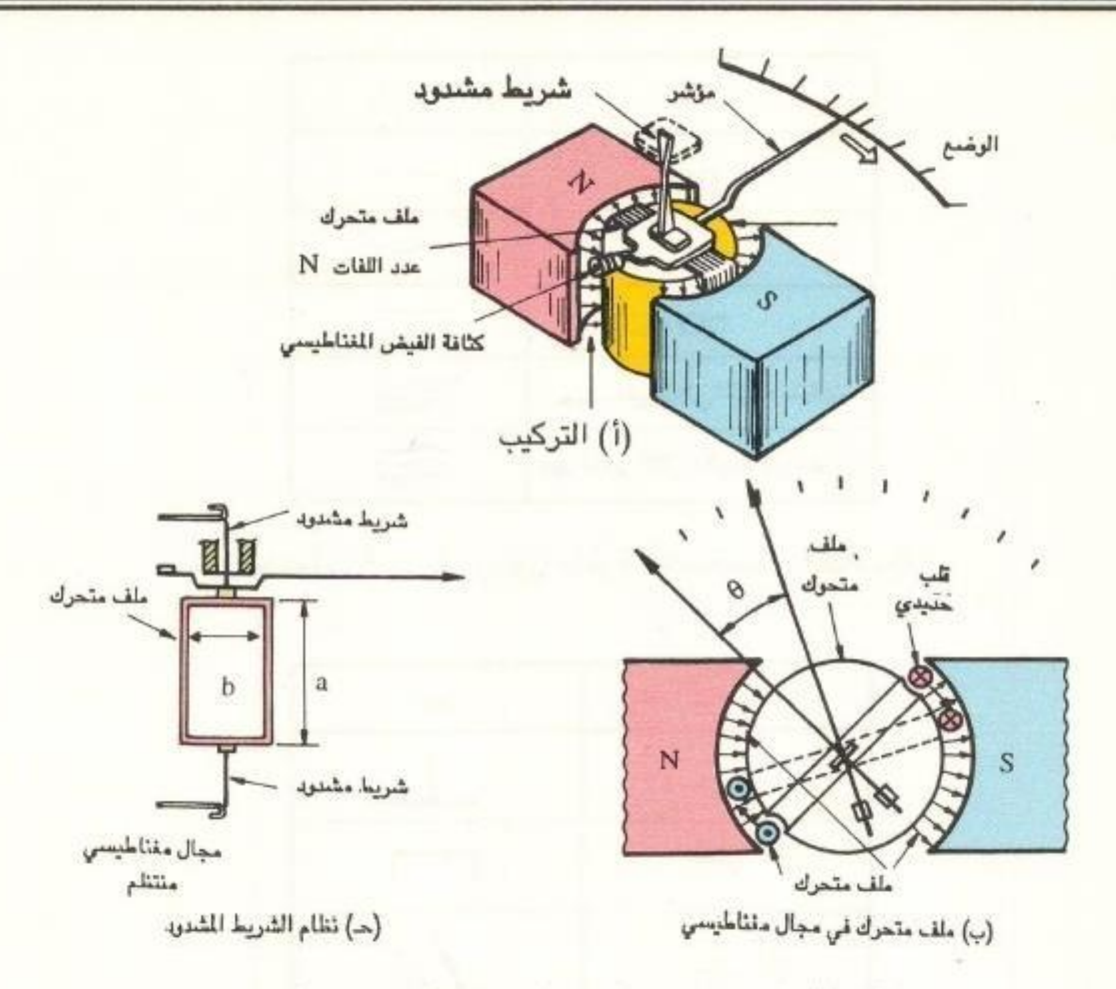
الرمز	الوضع
⊥	رأسي
⊓	أفقي
∠ 60°	مائل 60°

الجدول ٨ – ٥ رموز وضع الجهاز عند الاستخدام

ب – أجهزة القياس ذات الملف المتحرك Moving - coil type

يبين شكل ٨ – ٧ تركيب جهاز القياس ذى الملف المتحرك الذى يستخدم على نطاق واسع في أجهزة القياس الكهربائية ذات المؤشر .

كما هو موضح في الشكل ٨ – ٧ (أ) ، فإن المجال المغناطيسي العمودي يتولد بواسطة مغناطيس دائم مثبت حول قلب حديدى اسطوانى كما يوضع ملف حول اطار في الفجوة الهوائية . ويجذب هذا الملف بزنبرك سطحى يسمى الشريط المشدود من القمة إلى القاع كما هو مبين بالشكل ٨ – ٧ (ب) ويسمح له بدوران الملف .



الشكل ٨ – ٧ جهاز قياس ذو ملف متحرك

عند قياس التيار I المار في الملف المتحرك ، وطبقًا لقاعدة اليد اليسرى لفلمنج فإن العزم T_d المتولد يؤدي إلى دوران الملف كما هو موضح بالشكل ٨ – ٧ (ب). بافترض أن كثافة الفيض المغناطيسي للمغناطيس هي $B\ (T)$ وعدد لفات الملف N ، والتيار المار $I\ [A]$ وابعاد إطار الملف $a\ [m]$, $b\ [m]$ فإن العزم الناتج يعرف بالمعادلة الآتية :

$$T_d = BNabI \quad [N.m] \qquad (8-3)$$

ومن الناحية الأخرى نجد أن الزنبرك السطحى يولد قوة لاستعادة وضع الزنبرك إلى الوضع الأصلى ، ويسمى هذا بعزم التحكم T_C ويوصف بالمعادلة الآتية مع اعتبار زاوية دوران المؤشر θ .

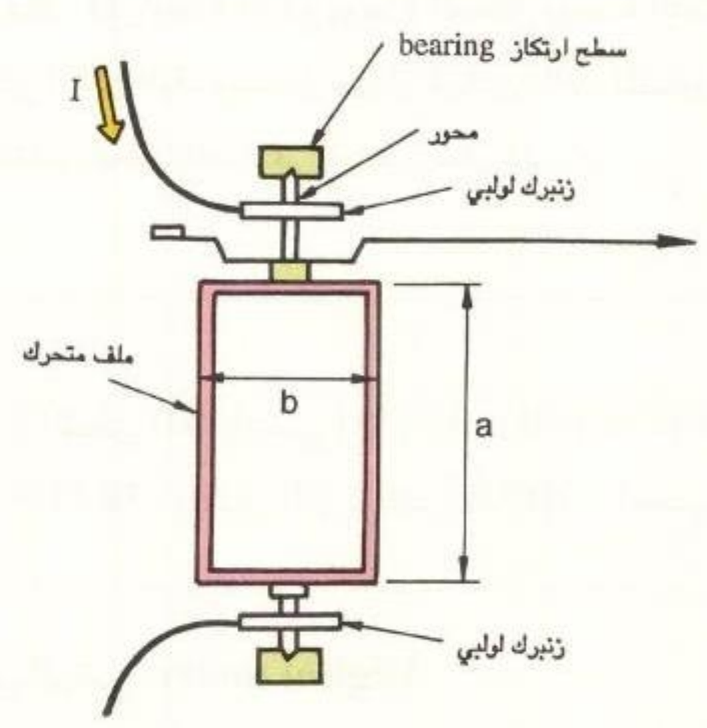
$$T_c = k\,\theta\,[N.m] \qquad (8-4)$$

و k هنا هي ثابت يحدد طول وسمك المادة المكونة للزنبرك السطحى . إن معدل انحراف المؤشر يتوقف عند وضع الاتزان عندما يتساوى العزمان T_c , T_d ونتيجة لهذا فإن زاوية انحراف المؤشر يمكن الحصول عليها من المعادلة الآتية، والتى تبين تناسب زاوية الانحراف θ مع التيار المار بالملف :

$$\theta = \frac{B\,N\,ab}{k}\,I \qquad (8-5)$$

وبالتالي فإن وحدة الدفع هي الجزء الذى يولد العزم اللازم لانحراف المؤشر طبقًا للكمية المقاسة . ووحدة التحكم هي الجزء الخاص بتوليد عزم التحكم ضد عزم الدفع ليعيد المؤشر إلى الوضع صفر .

وحدة التحكم تشمل الزنبرك اللولبى الموضح بالشكل ٨ – ٨ بالإضافة إلى النوع الشريطى المشدود .



الشكل ٨ – ٨ التحميل المحوري

في النوع الزنبركي اللولبي يثبت ملف الزنبرك اللولبى على محامل مركزية ، وهذا النوع يسمى نظام التحميل المحورى . ويوضح الشكل ٨ - ٧ (جـ) نظام الشريط المشدود . وهذا النظام يستعمل عادة في حالة عدم وجود احتكاك وتآكل للمحمل وذلك للحفاظ على دقة القياس كما أنه يتحمل البخار والصدمات .

ويمثل الشريط المشدود والزنبرك اللولبى ممراً للتيار للمرور إلى الملف المتحرك . كما أنه يستغرق بعض الوقت لوقف تأرجح المؤشر خلال زمن اتزان عزم الدفع مع عزم التحكم. هذا الزمن يمكن أن يخفض بفرملة حركة المؤشر . ويسمى الجهاز المستخدم في ذلك بوحدة الإخماد. والملف المستخدم في أجهزة القياس ذات الملف المتحرك يلف على إطار من الألومنيوم الذى يتكون من لفة واحدة . وعندما يقطع الإطار خطوط القوى المغناطيسية للمغناطيس الدائم، يمر تيار كهربائي في إطار الالومنيوم طبقًا لقاعدة اليد اليمنى لفلمنج . والقوة الكهرومغناطيسية المتولدة بسبب مرور التيار وخطوط القوى المغناطيسية تعمل على منع حركة الملف كقوة فرملة . وهكذا فإن وحدة الدفع ووحدة التحكم ووحدة الإخماد تمثل ثلاثة عناصر رئيسة لأجهزة البيان الكهربائية، ويتميز جهاز قياس الملف المتحرك بالحساسية العالية والتدريج الدقيق ويستخدم بصفة خاصة في قياس التيار المستمر .

سؤال ١

إذا كانت كثافة الفيض المغناطيسي $B = 0.5$ [T] ، $a = 2$ [C m] ، $b=2$ [C m] وعدد اللفات $N = 200$ لفة ، والتيار المار بالملف 5[mA] ، احسب عزم الدفع .

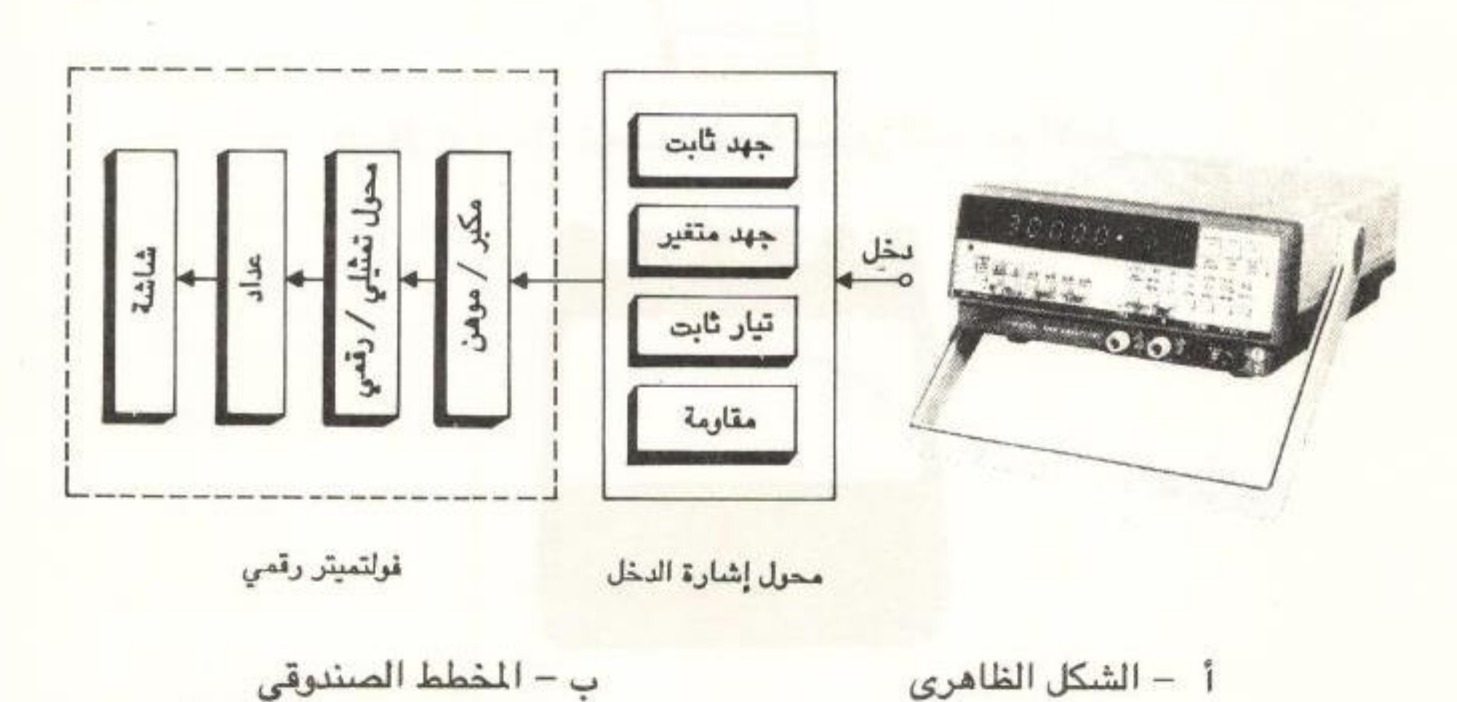
حـ - جهاز القياس الرقمى Digital meter

جهاز القياس الرقمي هو جهاز قياس كهربائى يظهر الكميات المقاسة في صورة أرقام وقد كانت أغلب أجهزة القياس الكهربائية المستخدم في السابق أجهزة تمثيلية . وقد بدأت أجهزة

القياس الرقمية في الانتشار بسرعة مع التقدم السريع في تصنيع أشباه الموصلات والهندسة الرقمية . وبالمقارنة مع أجهزة القياس التمثيلية، فإننا نلاحظ أن أجهزة القياس الرقمية تتميز بسهولة القراءة ويسر التسجيل وإرسال البيانات ومعالجتها .

وفي الوقت الحاضر تستخدم اجهزة القياس الرقمية لقياس الجهد و التيار والمقاومة والتردد . ويوضح الشكل ٨ – ٩ المظهر الخارجي والتركيب الأساسى لجهاز رقمى متعدد القياس . ويمكن استخدام هذا الجهاز لقياس الجهد والتيار غير المتردد والجهد المتردد والمقاومة .

فى الشكل ٨ – ٩ (ب) نجد أن الكمية المقاسة تم توصليها على أطراف الدخل حتى تحول إلى جهد ثابت وتكبر وتوهن كي تدخل محول الجهد التمثيلي / الرقمى . وبعد عملية التحويل التمثيلية / الرقمية ؛ يتم حساب عدد النبضات في دائرة العد وتظهر نتيجة القياس كأرقام مضاءة بواسطة ثنائيات البعث .



أ – الشكل الظاهرى
ب – المخطط الصندوقي

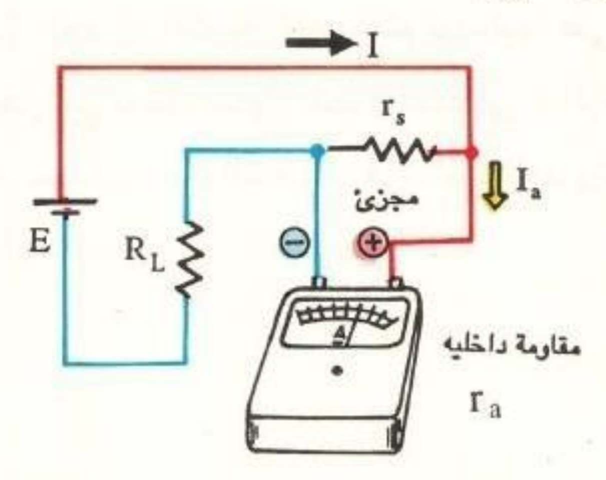
الشكل ٨ – ٩ جهاز رقمي متعدد القياس

٨ – ٣ أجهزة القياس ذات المؤشر Pointer type meters

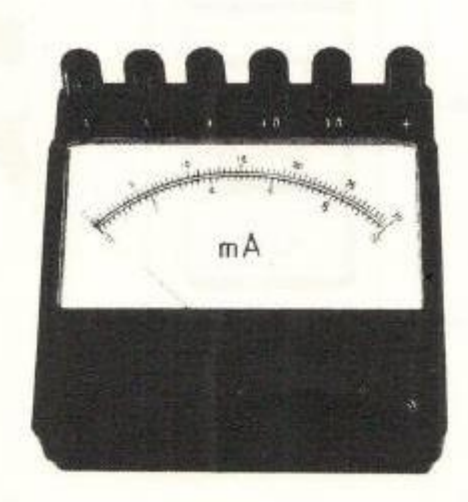
٨ – ٣ – ١ جهاز قياس التيار المستمر DC meters

أ – جهاز قياس الأمبير DC ammeter

تتناسب زاوية انحراف الملف المتحرك مع شدة التيار المار في الملف، ويستخدم ذلك لقياس التيار المستمر . ولقياس تيار كبير، يتم توصيل مقاومة على التوازي مع جهاز قياس الأمبير كما هو مبين بالشكل ٨ – ١٠ ، وهو ما يسبب عدم سماح الملف المتحرك المصنوع من الأسلاك الرفيعة بمرور التيار الكبير .



الشكل ٨ – ١٠ توصيل مقاومة مجزئ التيار مع الأميتر



الشكل ٨ – ١١ أميتر متعدد التدريج

وتمثل مقاومة الملف المتحرك المقاومة الداخلية لجهاز الأميتر، ويرمز لها بالرمز r_a (Ω) المقاومة الموصلة على التوازى r_s (Ω) ويمكن حساب التيار I_a المار بجهاز الاميتر بالنسبة للتيار الكلى I للدائرة كما يلى :

$$I_a = \frac{r_s}{r_s + r_a} I \qquad (8-6)$$

$$I = \frac{r_s + r_a}{r_s} I_a = (1 + \frac{r_a}{r_s}) I_a$$

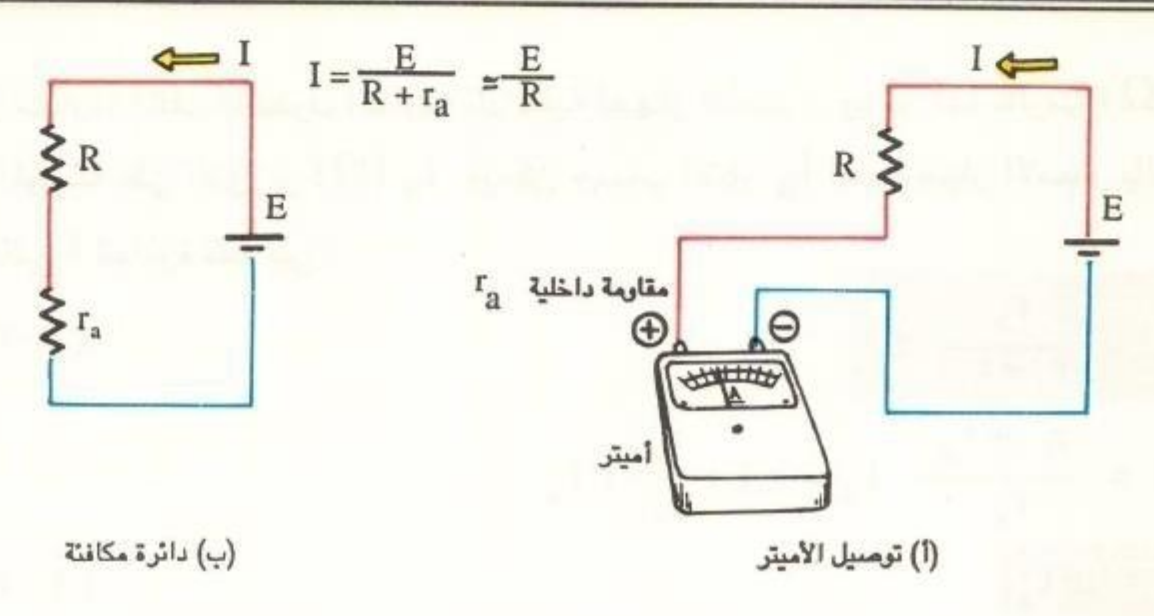
$$I = m I_a \qquad (8-7)$$

وهكذا فإن المقاومة r_s تمكن من قياس تيار مقداره m مرة قدر التيار المسموح به داخل الملف المتحرك . وتسمى المقاومة r_s بمقاومة تجزئة التيار . ومعامل تكبير تجزئة التيار يوصف بالمعادلة الآتية :

$$m = 1 + \frac{r_a}{r_s}$$

وعمومًا فإن مقاومة تجزئة التيار تكون بداخل جهاز الأميتر . وجهاز الأميتر ، الذي يشمل أكثر من مقاومتين لتجزئة التيار يسمى جهاز أميتر متعدد التدريج .

ويوصل جهاز الأميتر على التوالى مع الدائرة كما هو موضح بالشكل ٨ – ١٢ (أ) ودائرته المكافئة تمثل بالشكل ٨ – ١٢ (ب)، ومعادلة التيار I [A] موضحة أيضًا بالشكل . فعندما تكون المقاومة r_a صغيرة نسبيًا بالنسبة للمقاومة R فيمكن إهمال المقاومة r_a عمليا .



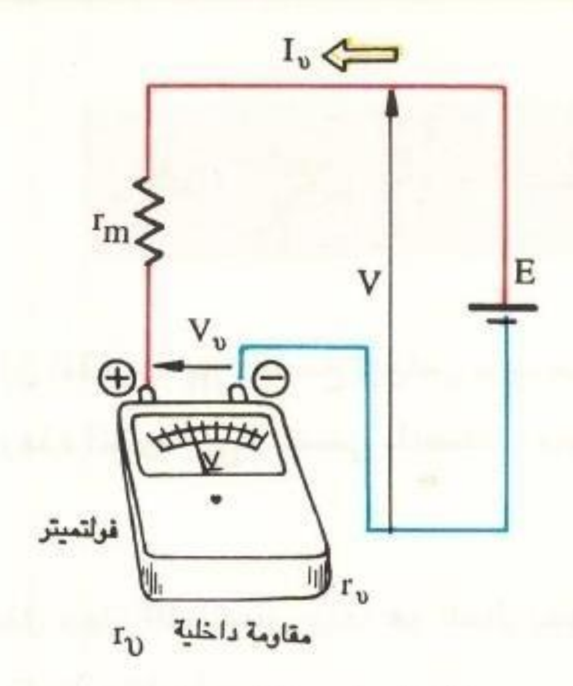
الشكل ٨ – ١٢ جهاز قياس التيار (الأميتر) ودائرة القياس

سؤال٢

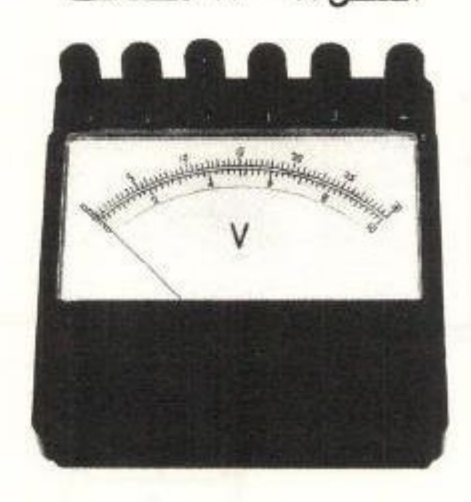
احسب مقاومة مجزئ التيار الموصلة بجهاز أميتر بحيث يكون أقصى تيار للملف 1[mA] والمقاومة الداخلية تكافئ $50\ \Omega$ حتى يتمكن جهاز الأميتر من قياس أقصى تيار 10[mA] .

ب – جهاز قياس الجهد المستمر DC voltmeter

يمكن استخدام جهاز الملف المتحرك في جهاز قياس الجهد المستمر . وكذلك يمكن استخدام الأميتر من نوع الملف المتحرك الذي له أقصى تدريج [mA] 1 ومقاومـــة داخلية [Ω] 50 كجهاز قياس الجهد باقصى تدريج [mV] 50 . هذا التدريج لايمكن استخدامه في قياس الجهد الكبير، لذا يتم ادخال مقاومة بجهاز القياس كما هو موضح بالشكل ٨ – ١٣ لاستعماله كڤولتميتر .



الشكل ٨ - ١٣ مضاعف



الشكل ٨ - ١٤ جهاز ڤولتميتر متعدد التدريج

بافتراض أن مصدر جهد التغذية هو [V] V والتيار المار إلى جهاز الڤولتميتر $I_\upsilon[A]$ والمقاومة الداخلية $r_\upsilon[\Omega]$ والمقاومة الموصلة على التوالى $r_m\ [\Omega]$ والجهد المسلط على جهاز الڤولتميتر $V_\upsilon[V]$ إذن يمكن استنتاج المعادلات الآتية :

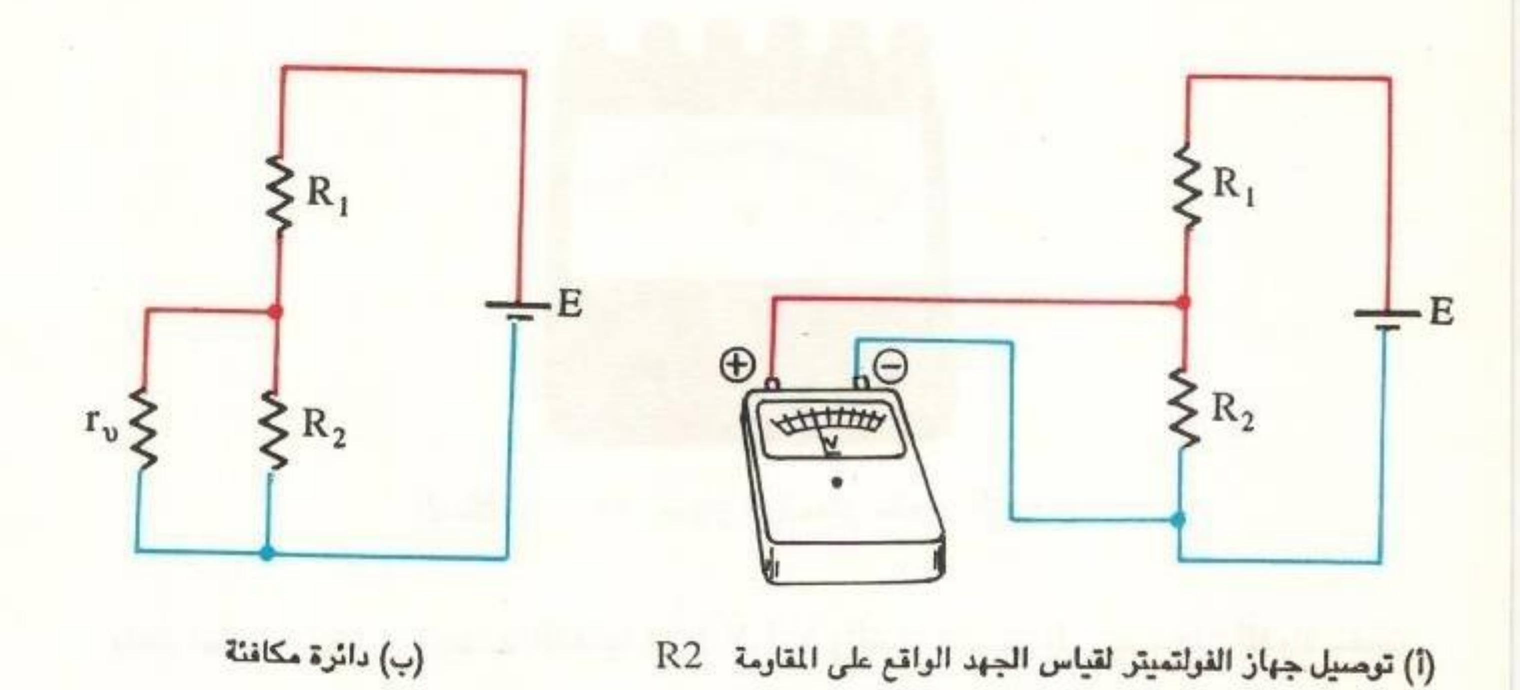
$$V_\upsilon = r_\upsilon I_\upsilon = \frac{r_\upsilon}{r_m + r_\upsilon} V \qquad (8-8)$$

$$V = \frac{r_m + r_\upsilon}{r_\upsilon} V_\upsilon = (1 + \frac{r_m}{r_\upsilon}) V_\upsilon = nV_\upsilon \qquad (8-9)$$

ومن هذه المعادلات نجد إن المقاومة r_m تسمح لقياس جهد مقداره n مرة قدر الجهد المسلط على جهاز القياس ؛ وهذه المقاومة r_m تسمى بالمضاعف ومضاعفتها تعرف بالمعادلة

$$n = 1 + \frac{r_m}{r_\upsilon}$$

ويوجد عادة المضاعف داخل جهاز الفولتميتر. وكما هو الحال بجهاز الأميتر فإن الفولتميتر متعدد التدريج له أكثر من مقاومتين للتضاعف .



(ب) دائرة مكافئة

(أ) توصيل جهاز الفولتميتر لقياس الجهد الواقع على المقاومة R2

الشكل ٨ – ١٥ فولتميتر ودائرة القياس الخاصة به

يجب أن يوصل جهاز الفولتميتر على التوازى مع الجزء المقاس . وتستخدم الدائرة بالشكل ٨ – ١٦ في تحليل تأثير المقاومة الداخلية .

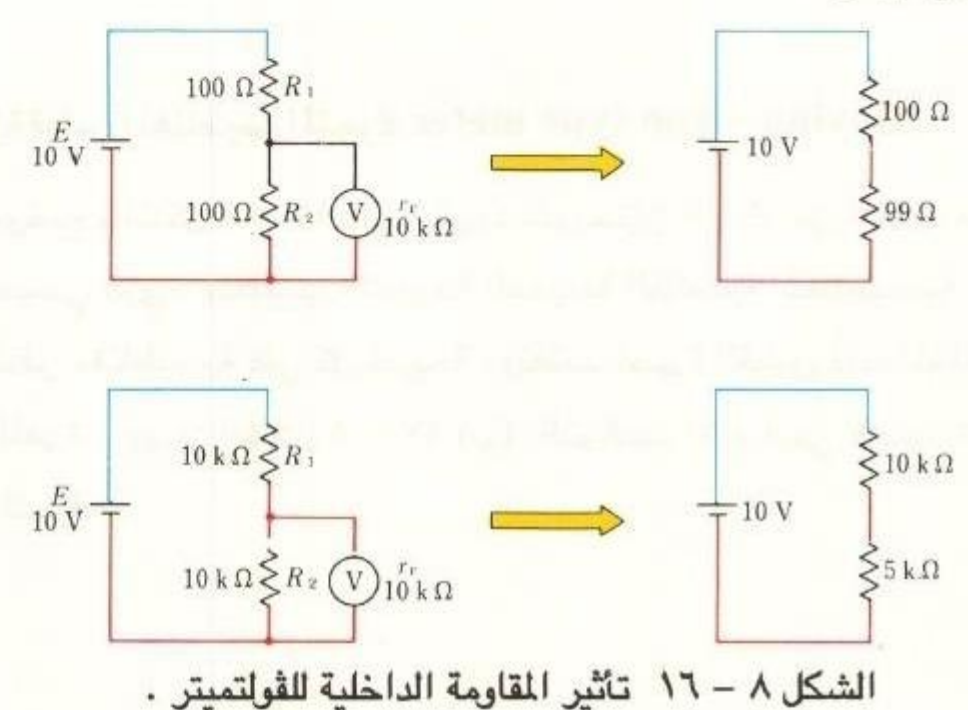
كما هو موضح بالشكل ٨ – ١٦ (أ) و (ب) سوف نقوم بحساب الجهد المبين بجهاز قياس الڤولتميتر المزود بالمقاومة الداخلية $10\ k\ \Omega$. وكما في الشكل ٨ – ١٦ (أ) توصل مقاومة قيمتها حوالي $99\ \Omega$ وهى تمثل محصلة المقاومتين R_2 , r_v على التوازي . وفى هذه الحالة فإن الجهد V_a [v] الواقع على الڤولتميتر يمكن حسابه بالمعادلة الآتية .

$$V_a = \frac{99}{100 + 99} \times 10 = 4.97\ V$$

وفي الشكل ٨ – ١٦ (ب) نجد أن المقاومة المحصلة من توصيل المقاومة r_v , R_2 تكافئ $5\ k\ \Omega$ وفى هذه الحالة فإن الجهد V_b [V] الواقع على الڤولتميتر يتم حسابه بالمعادلة الآتية :

$$V_b = \frac{5000}{10000 + 5000} \times 10 = 3.3\ V$$

وفي الدوائر الموضحة بالأشكال ٨ – ١٦ (أ) و (ب) يكون الجهد المسلط على المقاومة R_2 بدون توصيل الڤولتميتر هو $5V$. ولهذا فإن صغر المقاومة الداخلية للڤولتميتر بالمقارنة بمقاومة دوائر القياس كما بالشكل ٨ – ١٦ (ب) يجعل الخطأ كبيراً في القياس مما يتطلب حرص القائمين بالقياس .



الشكل ٨ – ١٦ تأثير المقاومة الداخلية للڤولتميتر .

سؤال ٣

استعرض المقاومة الداخلية للفولتميترات المختلفة و اجهزة اختبار الدوائر والفولتميترات الإلكترونية .

سؤال ٤

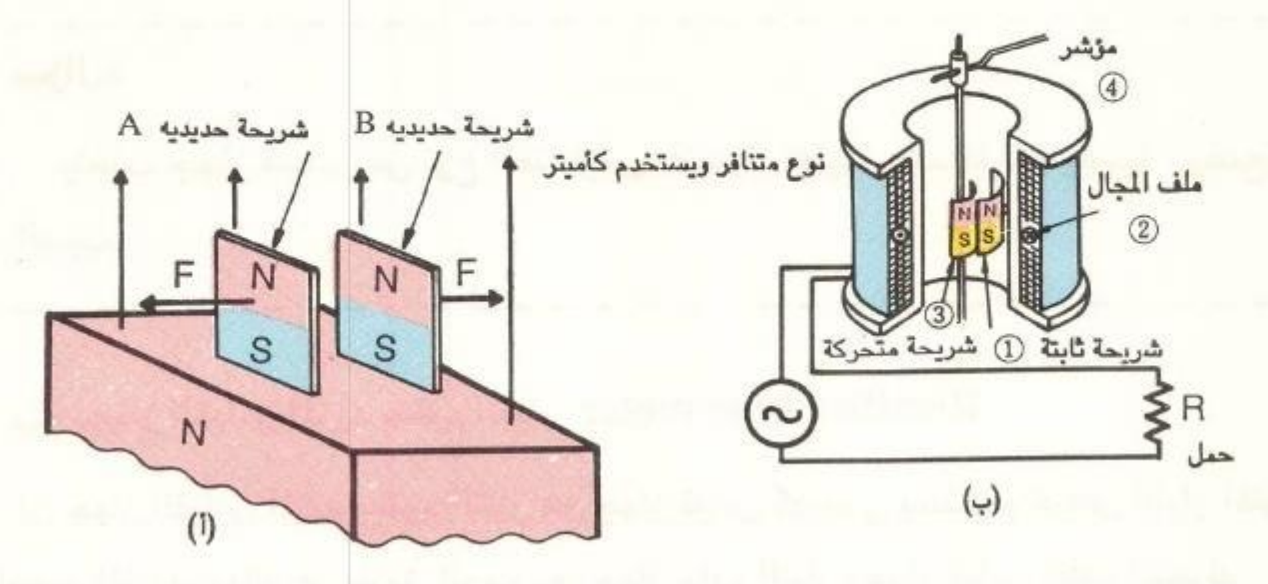
احسب مقادير المضاعف لتحويل فولتميتر بأقصى تدريج 10[V] ومقاومة داخلية 10 k [Ω] إلى فولتميتر بأقصى تدريج 100[V] .

٨ – ٣ – ٢ جهاز قياس التيار المتغير (المتردد) AC meters

أجهزة قياس التيار المتردد المستخدمة بكثرة في الأغراض التجارية مثل الأميتر والفولتميتر تستعين بنوعين من المغناطيس النوع الأول هو المغناطيس المتحرك والثاني هو المغناطيس المقوم.

أ – اجهزة قياس المغناطيس المتحرك Moving - iron type meter

كما هو موضح بالشكل ٨ – ١٧ (أ) ، توجد شريحتان A , B من الحديد موضوعتان في مجال مغناطيسي قوي، وتكتسب الشريحة الحديدية الخاصية المغناطيسية كما بالشكل، وتتولد قوة تنافر مغناطيسية على كل شريحة ، وتعتمد أجهزة القياس ذات المغناطيس المتحرك على هذه الظاهرة . ويبين الشكل ٨ – ١٧ (ب) التركيب الأساسي لأجهزة القياس ذات المغناطيس المتحرك .



الشكل ٨ – ١٧ جهاز القياس من نوع المغناطيس المتحرك

كما هو موضح بالشكل ٨ – ١٧ (ب) عندما توضع شريحة المغناطيس المتحرك (3) وجهاً لوجه مع شريحة المغناطيس الثابت (1) لكى تسمح بحرية الحركة ويمر التيار خلال الملف (2) حول الشرائح المغناطيسية ، تكتسب الشرائح المغناطيسية الخاصية المغناطيسية وتتولد قوة تنافر بين المغناطيسين . أما إذا عكس مرور التيار بالملف فإنه يعكس اتجاه الخطوط المغناطيسية في الشريحتين المغناطيسيتين وتتولد قوة تنافر بينها أيضا، ومن ثم عندما يمر تيار خلال الملف تتولد قوة تنافر بين الشريحتين المغناطيسيتين بغض النظر عن اتجاه التيار . ويتحرك المؤشر (4) المثبت بشريحة المغناطيس المتحرك ويتوقف دوران المؤشر عندما تتزن قوة التنافر مع العزم الناتج من مرونة الزنبرك اللولبي . ويكون العزم المتولد بين الشرائح المغناطيسية متناسباً مع مربع شدة التيار المار بالملف والذى يعوق تدرج القياس. إلا أن التدرج يتم عملياً بتحسين شكل الشرائح المغناطيسية .

وبما أن جهاز قياس المغناطيس المتحرك لا يحتاج تياراً إلى الأجزاء المتحركة فإن هذه الأجهزة تستخدم في قياس الكميات الكبيرة من التيار والجهد مثل الأميترات ذات أقصى تدريج من 20mA إلى 100A والفولتميترات ذات أقصى تدريج من 15V إلى 600V .

سؤال ٥

يتطلب جهاز قياس من نوع المغناطيس المتحرك تغليفًا ضد المغناطيسية . وضح السبب

ب – جهاز القياس المزود بمقوم التيار Rectifier type meter

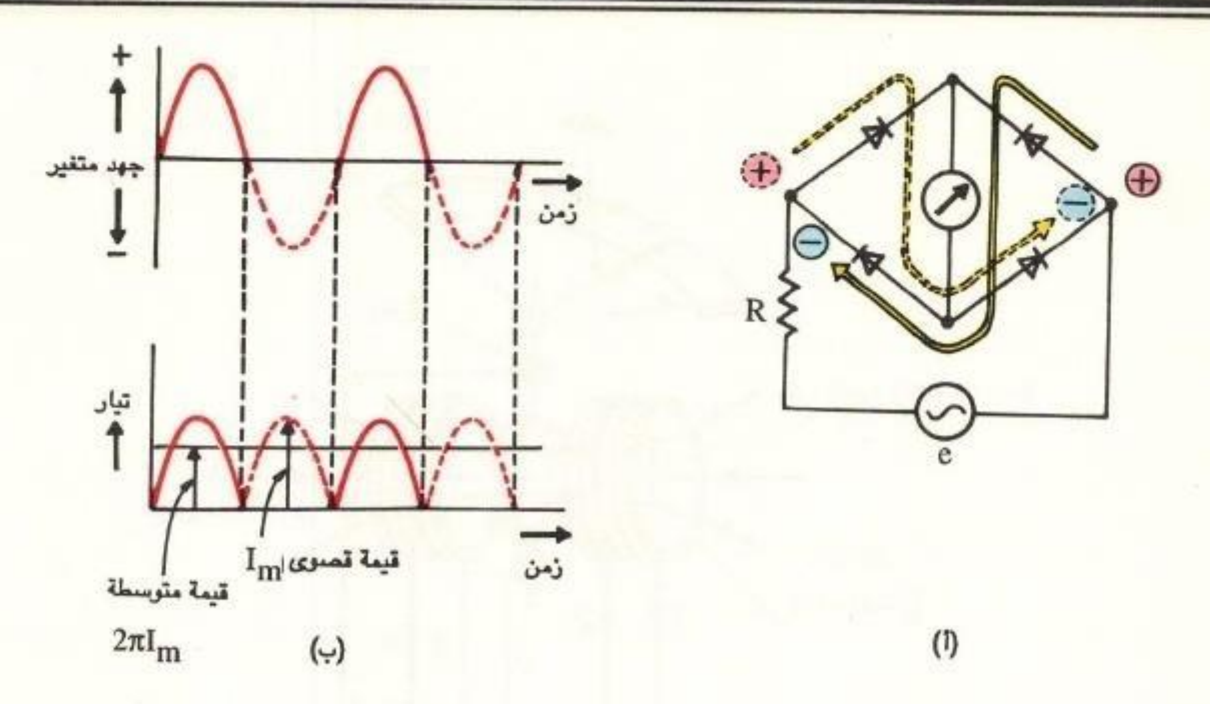
إن جهاز القياس المزود بمقوم التيار هو جهاز قياس كهربائى يستخدم لقياس التيار المتردد والجهد المتردد، وذلك عن طريق الجمع بين جهاز مقوم التيار وجهاز قياس الملف المتحرك .

وتستخدم الثنائيات التي يمكن أن تقوم بعملية التقويم وجهاز قياس الملف المتحرك كما هو موضح بالشكل ٨ – ١٨ (أ) . وبغض النظر عن اتجاه الجهد فإن التيار المبين بالخطوط المتصلة والمتقطعة يمر خلال جهاز القياس في الاتجاه نفسه كما هو مبين بالشكل ٨ – ١٨(ب).

ويحصل الملف المتحرك على عزم يتناسب مع القيمة المتوسطة للتيار وينحرف المؤشر طبقًا لتلك القيمة المتوسطة . إلا أن القيمة الفعالة للتيار المتردد يمكن قياسها بجعل تدريج جهاز القياس المقوم يتحول ليُظهر القيمة الفعالة ؛ ولهذا عند قياس موجه الجهد غير الجيبية يحدث خطأ لأن نسبة القيمة المتوسطة والقيمة الفعالة تتغير .

سؤال٦

احسب القيمة القصوى والفعالة لموجة جهد جيبية قيمتها المتوسطة 100V .

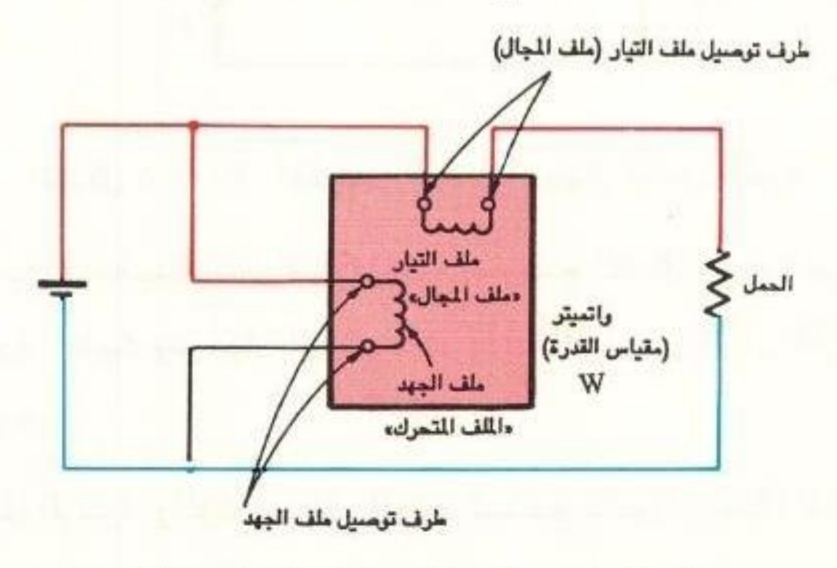


الشكل ٨ –١٨ جهاز قياس بمقوم للتيار

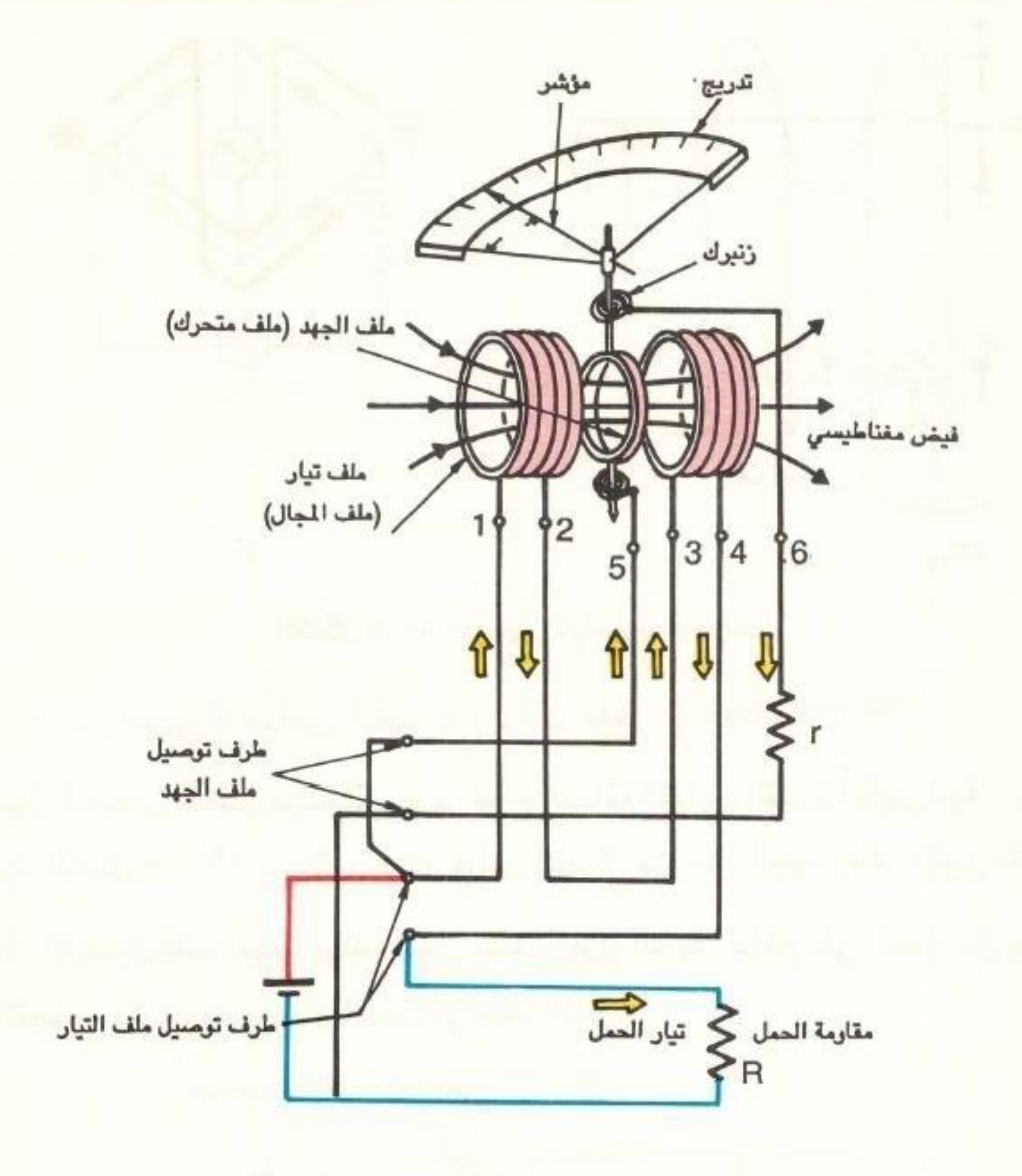
٨ – ٤ أجهزة قياس القدرة (وات ميتر) Wattmeters

جهاز القياس الكهروديناميكى يعدّ النوع الشائع لقياس القدرة الكهربائية ، وكما هو موضح بالشكل ٨ – ١٩ ، يتكون جهاز قياس القدرة من ملف الجهد وملف التيار متصلين .

هذا التوصيل لملف الجهد وملف التيار يسمح لفرق الجهد الواقع على الحمل بأن يسلط على ملف الجهد ، وكذلك بمرور تيار الحمل في ملف التيار .



الشكل ٨ – ١٩ قياس القدرة الكهربائية



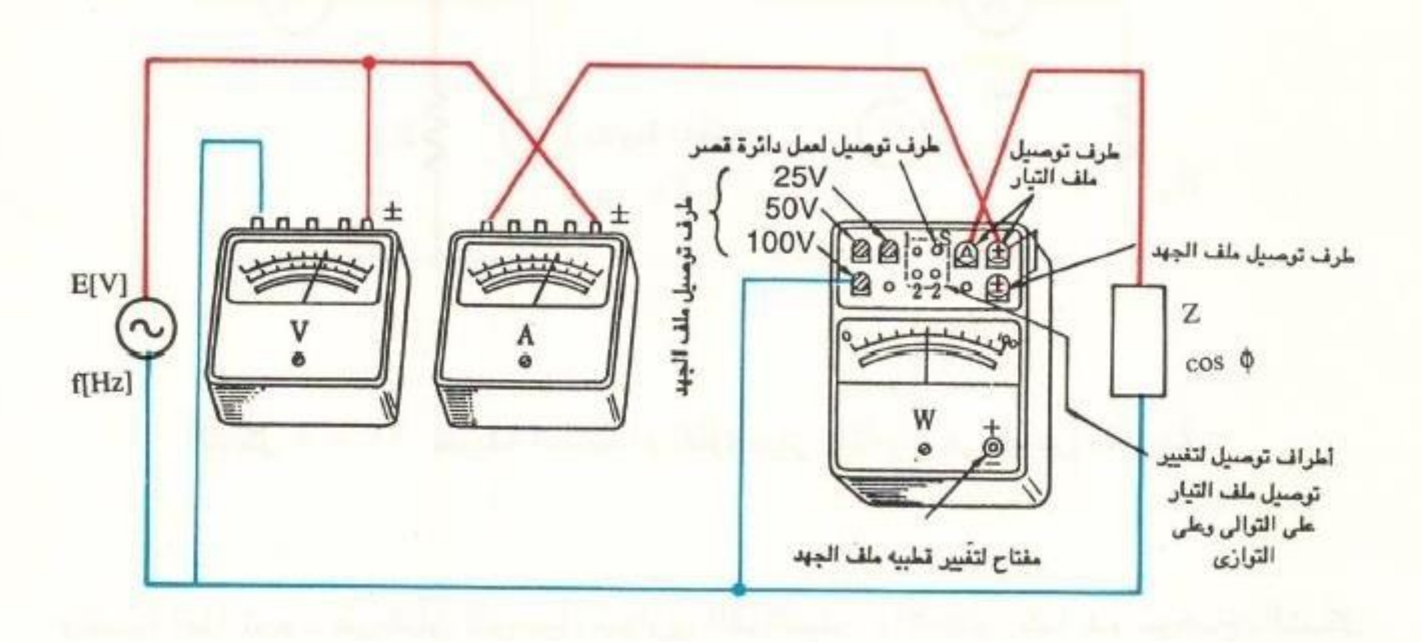
الشكل ٨ - ٢٠ المكونات الداخلية لجهاز قياس القدرة

وتقاس القدرة بقراءة قيمة انحراف المؤشر . ويوضح الشكل ٨ -٢٠ مخطط عمل لدائرة جهاز قياس القدرة ، حيث يمر تيار الحمل خلال ملف التيار، والتيار المار يتناسب مع فرق الجهد لمصدر القدرة .

كما يتم توصيل الزنبرك والمؤشر بملف الجهد ليسمح بالدوران طبقًا للعزم المتولد، وزاوية الدوران θ للمؤشر تتناسب مع العزم المتولد .

والعزم المتولد يتناسب مع شدة المجال المغناطيسى ومع التيار المار بملف الجهد . وكذلك فإن شدة المجال المغناطيسى تتناسب مع التيار المار بملف التيار . لذلك فإن زاوية الانحراف θ تتناسب مع حاصل ضرب تيار الحمل وجهد الحمل أي إن زاوية الانحراف تتناسب مع القدرة الكهربائية .

يمثل الشكل ٨ – ٢١ دائرة قياس الجهد والتيار وقدرة دائرة تيار متردد .



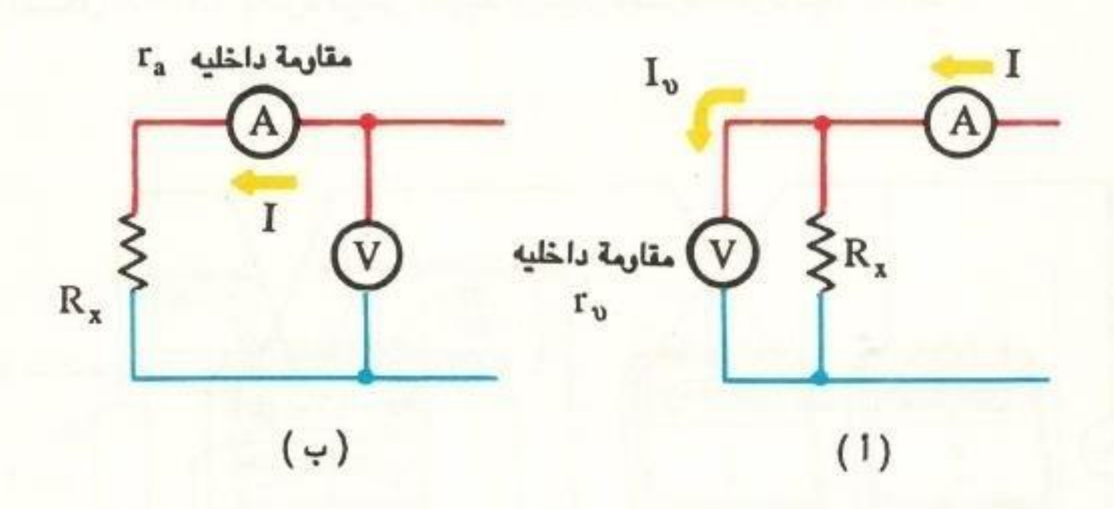
الشكل ٨ – ٢١ دائرة تبين طريقة قياس القدرة والجهد والتيار .

٨ – ٥ قياس المقاومة والحث والسعة الكهروستاتيكية

٨ – ٥ – ١ قياس المقاومة Measurement of resistance

تشمل المقاومة الكهربائية أنواع مختلفة مثل مقاومة التوصيل ومقاومة العزل والمقاومة الأرضية وتتراوح قيم هذه المقاومات من 1Ω أو أقل إلى عدة $M\,\Omega$ أو أكثر، وتقاس المقاومة بطرق مختلفة تناسب نوعها ومقدارها . وفى هذا البند سيتم تناول وسائل القياس المناسبة.

تحسب المقاومة بالمعادلة $R_x = \frac{V}{I}\ [\Omega]$ على أساس قياس فرق الجهد [V] V الواقع على المقاومة المجهولة R_X والتيار المار بالمقاومة I[A] . وتسمى هذه الطريقة طريقة الڤولتميتر أو طريقة هبوط الجهد .



الشكل ٨ – ٢٢ طريقة استخدام الڤولتميتر والأميتر في قياس المقاومة

ونتيجة لهذا توجد طريقتان لتوصيل جهازى الڤولتميتر والأميتر كما هو موضح بالشكل ٨ – ٢٢ (أ) و (ب) وبافتراض أن القيمة المبينة بالڤولتميتر هي V(V) وتلك المبينة بالأميتر هي I(A) ففي الشكل ٨ – ٢٢ (أ) .

$$R_x = \frac{V}{I - I_\upsilon} = \frac{V}{I - \frac{V}{r_\upsilon}}$$

وفى الشكل ٨ – ٢٢ (ب)

$$R_x = \frac{V - r_a I}{I} = \frac{V}{I} - r_a$$

ولذلك فـإن الطريقـة المذكـورة بالشكل ٨ – ٢٢ (أ) تسـتخـدم عندمـا تكون المقـاومـة R_x صغيرة نسبيا بالمقارنة بالمقاومة الداخلية r_v لجهاز الڤولتميتر والطريقة المذكورة بالشـــكل ٨ – ٢٢ (ب) تستخدم في قياس المقاومة الأكبر نسبيا من المقاومة الداخلية r_a لجهاز الأميتر.

حينئذ فإن المقاومة يتم حسابها بالمعادلة التاليـة :

$$R_x = \frac{V}{I} \quad [\Omega]$$

أيضًا تقاس المقاومة باستخدام قناطر، وتكون القياسات بهذه الطريقة دقيقة بالرغم من عدم سهولة تنفيذها. وقد سبق شرح الطريقة التى تستخدم قنطرة هويتستون في الفصل الأول .

ويستخدم جهاز الأقوميتر لقياس المقاومة بسهولة بالرغم من محدودية مدى القياس الذى يمكن أن يقوم به وهو جهاز سهل الاستخدام ويطبق قانون أوم لقياس المقاومة .

أ – تفاصيل أخرى

قد يحدث احتراق أو صدمة كهربائية بأجهزة القياس نتيجة وجود قصر بالدائرة أو نتيجة تأريض في حالة عدم كفاية العزل لدائرة الأجهزة الكهربائية. ولمنع حدوث هذه الحوادث يستخدم جهاز اختبار مقاومة العزل لقياس مقاومة العزل للأسلاك والأجزاء المختلفة لأجهزة القياس المستخدمة.



الشكل ٨ – ٢٣ جهاز اختبار مقاومة العزل .

وتقاس مقاومة العزل في الجهاز بتسليط جهد مثل 100V , 500V , 1000V (متولد في داخل جهاز الاختبار نفسه) لقياس الأشياء وتظهر القيمة المقاسة بانحراف إما المؤشر أو على شكل أرقام .

ويتولد فرق الجهد أما بواسطة مولد (ميجر) أو يزود بواسطة بطارية ، وفي الوقت الحاضر تستخدم البطارية بكثرة في هذا الغرض .

٨ – ٥ – ٢ قياس الحث والسعة الكهروستاتيكية

Measurement of inductance and electrostatic capacitance

إن قياس الحث والسعة الكهروستاتيكية لدائرة تيار متغير يتم بقياس التيار المتدفق وفرق الجهد المسلط عند تردد معين . تستخدم أجهزة القراءة المباشرة أيضاً في هذا القياس إلا أن القياس الدقيق يتم باستخدام قنطرة التيار المتغير .

وعلى عكس قياس المقاومة باستخدام قنطرة الاتزان ذات التيار الثابت ، فإن قياس الحث والسعة الكهروستاتيكية يتطلب قنطرة اتزان الممانعة مع مصدر قدرة متغيرة .

ويوضح الشكل ٨ – ٢٤ (أ) مخطط الفكرة لقنطرة الممانعة. حيث يتكون من الممانعات $\dot{Z}_1 , \dot{Z}_2 , \dot{Z}_3 , \dot{Z}_4$ ، بالاضافة إلى مصدر قدرة متغيرة بتردد 1kHz وكاشف D . عندما يبين مؤشر الكاشف صفراً عن طريق ضبط ممانعة كل جانب من القنطرة ، يحدث اتزان القنطرة وتتحقق العلاقة الآتيــة :

$$\dot{Z}_1 \dot{Z}_4 = \dot{Z}_2 \dot{Z}_3$$

مثال لذلك لو أن الممانعة المجهولة هى $\dot{Z}_1$ فيمكن حسابها كالآتى :

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 \dot{Z}_3 / \dot{Z}_4$$

وفي جهاز قنطرة الاتزان الفعلية، والمسماة بقنطرة الممانعة أو القنطرة الدولية، تستخدم

عناصر قياسية من المقاومة R و الملف L والمكثف C وتركب داخل القنطرة، ويتم عمل دوائر مختلفة لدائرة القنطرة باستخدام مفتاح متغير لمعرفة قيمة المقاومة المجهولة أو الملف أو السعة الكهروستاتيكية .

ويبين الشكل ٨ – ٢٤ (ب) الشكل الخارجي لقنطرة الاتزان .



أ – الفكرة   ب – الشكل الخارجى .

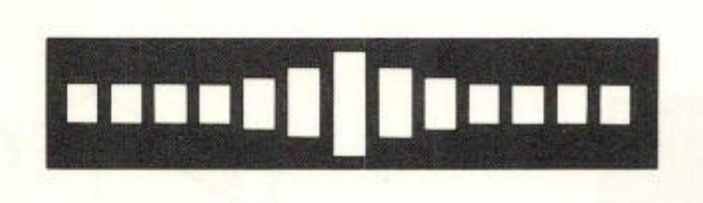
الشكل ٨ – ٢٤ قنطرة اتزان تيار متردد

٨ – ٦ قياس التردد Frequency measurement

جهاز قياس التردد يستخدم لقياس التردد للتيار المتردد . وتشمل أجهزة قياس التردد أنواع الريشة الرنانة ، والمقياس النسبي؛ وعداد التردد المصنوع بالتقنية الرقمية ، وفي الوقت الحاضر يستخدم عداد التردد على نطاق واسع .

٨ – ٦ – ١ جهاز قياس التردد ذو الريشة الهزازة (الرنانة) Vibrating reed





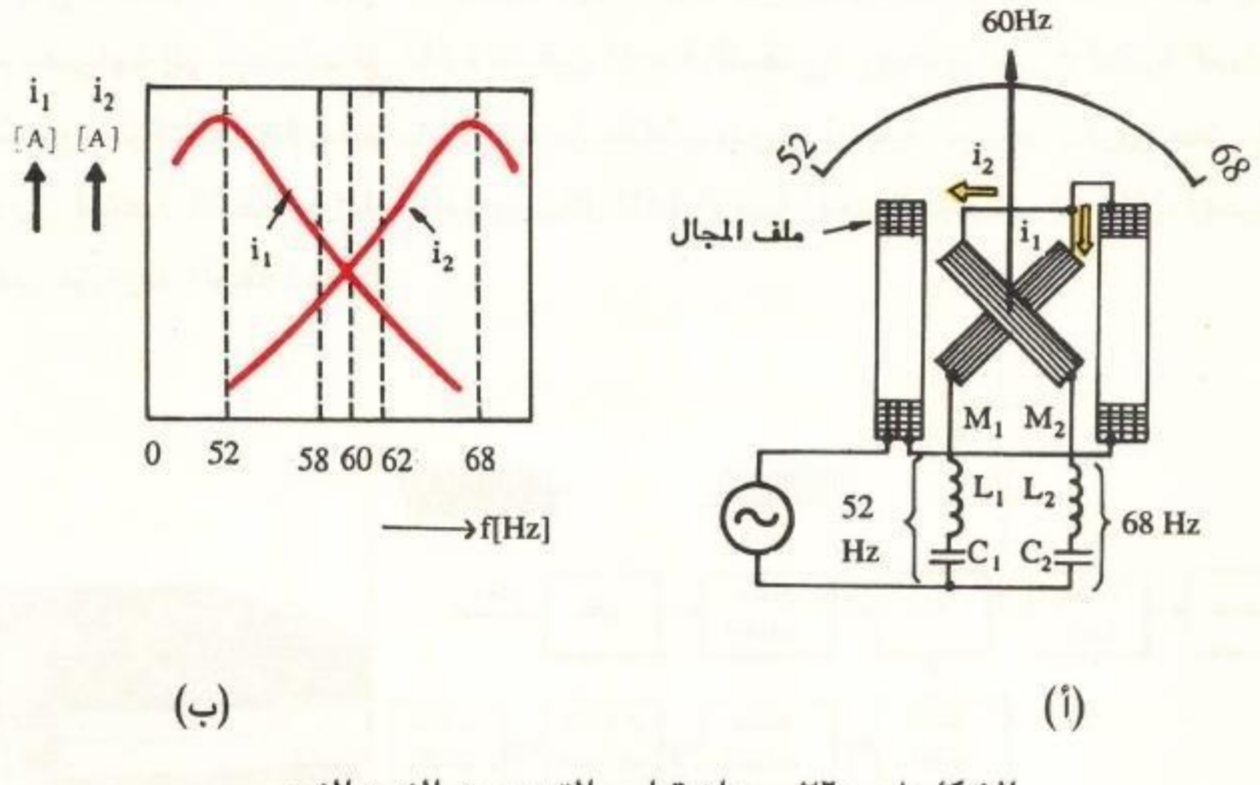
أ – الشكل الخارجـى ب – تهتز الريشة عندما يسلط مصدر جهد متغير ذو 50 هرتز

الشكل ٨ – ٢٥ جهاز قياس التردد ذو الريشة الهزازة

في جهاز قياس التردد ذى الريشة الرنانة، توضع الريش المهتزة التى لها تردد طبيعى بالقرب من مغناطيس كهربائي، ويوصل تيار متردد للمغناطيس من أجل اهتزاز الريش . ثم يقاس التردد بالريشة الهزازة التي تعطي أقصى ذبذبة بسبب الرنين، ويبين الشكل ٨ – ٢٥ الشكل الظاهري للجهاز وكذلك الريش الرنانة .

٨ – ٦ – ٢ جهاز قياس التردد المقسوم Quotient - meter type

كما هو موضح بالشكل ٨ – ٢٦ (أ) فإن المقياس النسبى يتركب عمومًا من ملفين متحركين متعامدين M_2 , M_1 لهما مؤشران موضوعان في ملفين ثابتين ، وينحرف المؤشر طبقًا لنسبة التيار i_2 , i_1 المارين في الملفين M_2 , M_1 .



(ب) (أ)

الشكل ٨ – ٢٦ جهاز قياس التردد من النوع النسبي

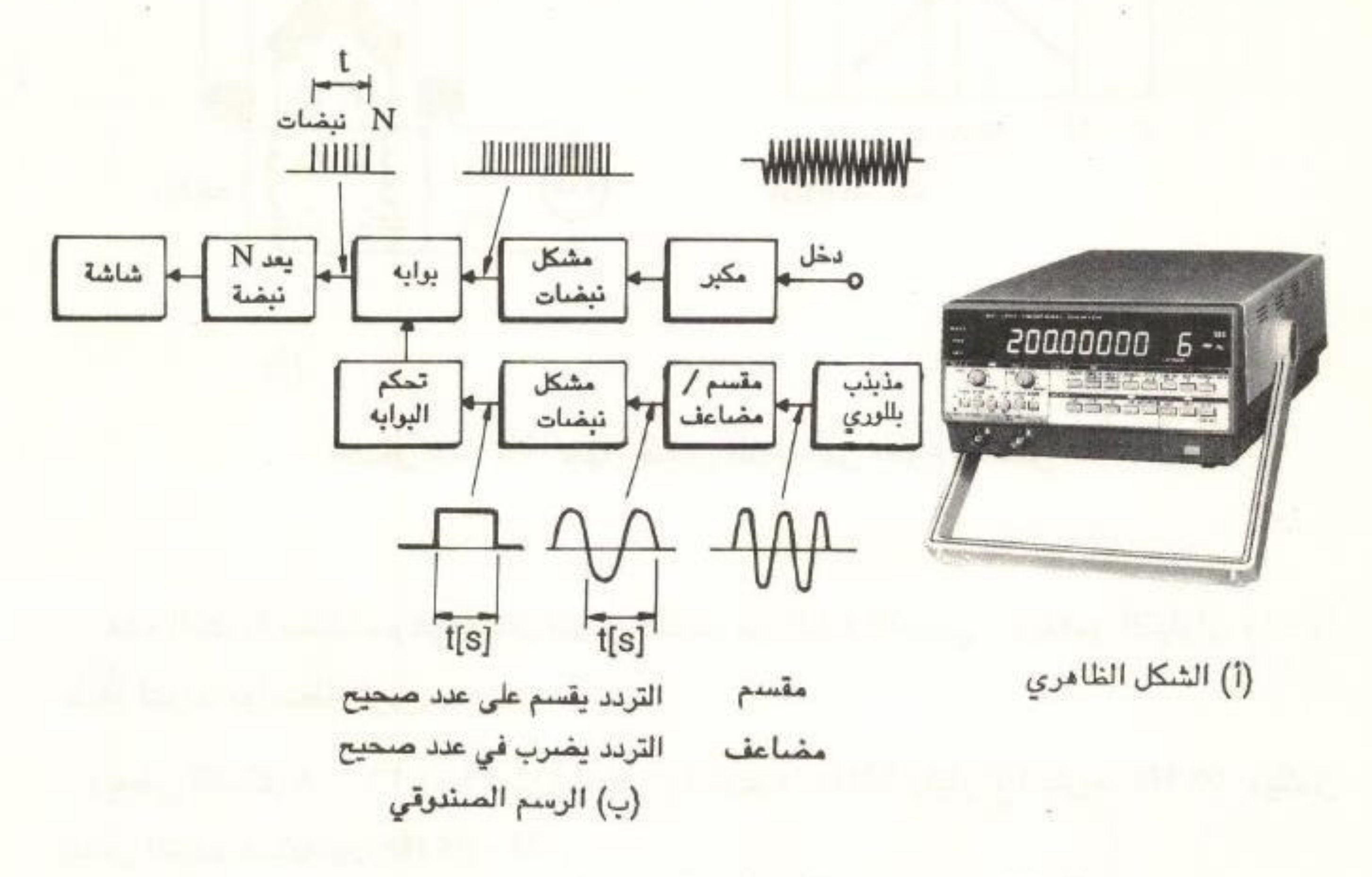
هذه النظرية تستخدم في جهاز قياس التردد من النوع النسبى ، ويتغير التياران i_2 ، i_1 طبقًا للتردد بواسطة الرنين .

ويعطي الشكل ٨ – ٢٦ (ب) مثالاً لتيار i_1 تردده 52Hz وتيار i_2 بتردد 68 Hz ويكون قياس التردد ممكنا بين 68 Hz - 52 .

٨ – ٦ – ٣ عداد التردد Frequency counter

عداد التردد هو جهاز قياس رقمي قادر على قياس المدة الزمنية بالإضافة إلى التردد : ويوضح الشكل ٨ – ٢٧ (أ) الشكل الخارجي للجهاز ، بينما يبين الشكل ٨ – ٢٧ (ب) الهيكل الأساسي له .

وفي الشكل ٨ – ٢٧ (ب) ، توصل الموجة المراد قياس ترددها إلى أطراف الدخل، والتي يتم تحويلها إلى نبضات في دائرة تشكيل الموجة النبضي، ويوصل الخرج لدائرة البوابة . وتسمح دائرة البوابة للنبضات المتولده من مذبذب بلورى أو مولد ذبذبات بالمرور خلال زمن معين . أماعدد النبضات المارة بالبوابة خلال المدة الزمنية المحددة فيحسب في دائرة الحساب وتعبر عن تردد الموجة الداخلة .



(أ) الشكل الظاهري

(ب) الرسم الصندوقي

الشكل ٨ – ٢٧ جهاز قياس التردد باستخدام عداد رقمي

وكمثال لذلك لو أن N نبضة مرت خلال البوابة في زمن $t\ [s]$ فيكون التردد f_X للموجة الداخلة كالآتي :

$$f_x = \frac{N}{t} \quad [Hz]$$

سؤال٧

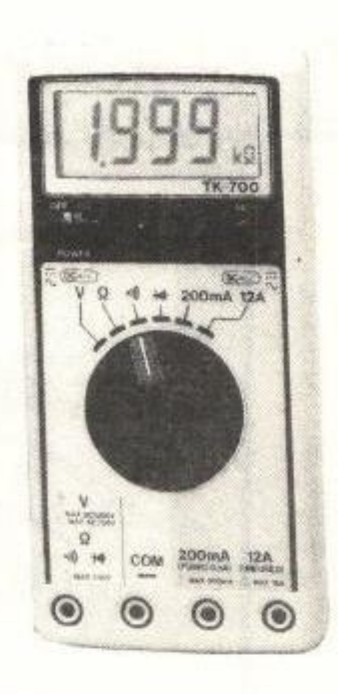
احسب التردد وكذلك المدة الزمنية اللازمة لو أن 18 نبضة تم عدها خلال 1ms بواسطة جهاز قياس التردد .

٨ – ٧ الأڤوميتر Avo-meter

الأڤوميتر الذى يسمى ايضاً جهاز اختبار الدائرة، يسمح بقياس الجهد والتيار والمقاومة بسهولة باستخدام مفتاح تحويل .

ويشمل الأڤوميتر جهاز اختبار تمثيلي لبيان الكمية المقاسة باستخدام مؤشر، أو جهاز اختبار رقمي ليظهر الكمية المقاسة بالأرقام .

يوضح الشكل ٨ – ٢٨ الشكل الخارجي لأڤوميتر تمثيلي وآخر رقمى .



جهاز رقمى



جهاز تمثيلى

الشكل ٨ –٢٨ جهاز أڤوميتر تمثيلي (الجانب الأيسر) وآخر رقمى (الجانب الأيمن)

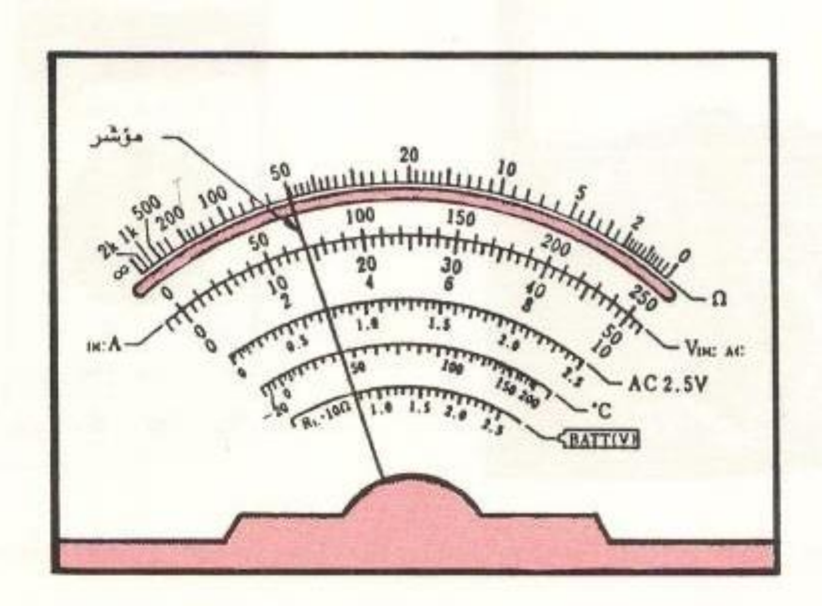
وتوجد أربعة متغيرات أساسية يمكن قياسها باستخدام الأفوميتر، وهى الجهد الثابت (DCV) والتيار الثابت (DCm A) والجهد المتغير (ACV) والمقاومة (Ω). بالإضافة لهذه الكميات الاربع يمكن قياس التيار المتغير والسعة الكهروستاتيكية للمكثف وكذلك درجة الحرارة.

ويمكن تجهيز الكمية المقاسة والمدى بواسطة مفتاح تحويل ، وهذه العملية تسمى ضبط المدى . مثال لذلك عندما يكون مفتاح التحويل على وضع DC 250 يمكن قياس الجهد الثابت لأقل من 250V .

٨ – ٧ – ١ جهاز الاختبار التمثيلي Analogue tester

يظهر جهاز الاختبار التمثيلي الكمية المقاسة بانحراف مؤشر جهاز الملف المتحرك على التدريج . ويتطابق تركيبه مع جهازى الأميتر والفولتميتر من نوع الملف المتحرك .

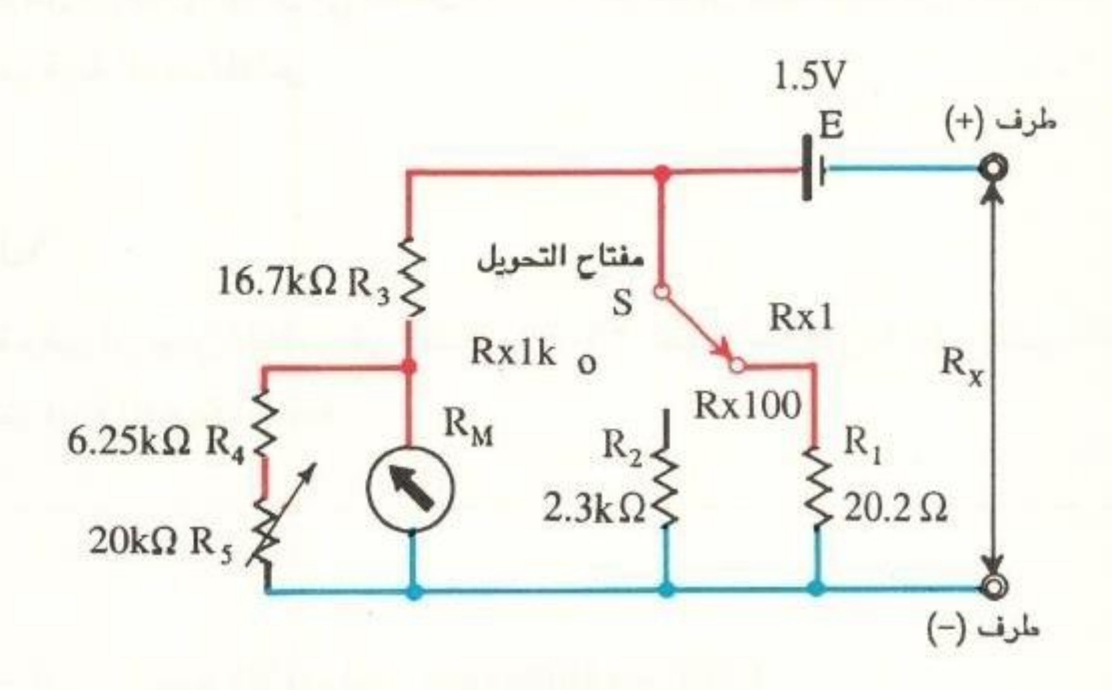
وتتدرج لوحة القراءة للكميات المقاسة كما هو موضح بالشكل ٨ – ٢٩. وتقرأ الكمية المقاسة مباشرة من انحراف المؤشر على التدريج طبقا لضبط المدى بواسطة مفتاح التحويل .



الشكل ٨ – ٢٩ مثال لتدريج جهاز الاختبار

ولقياس الجهد والتيار ، يتم تغيير المدى إلى الجهد أو التيار، ثم تتبع خطوات القياس المألوفه نفسها وقد لايشمل التدريج كل قيم المدى، ومثال لذلك فإن القراءة للمدى DC 500V يمكن قياسها على التدريج DC 50V ويكون معامل الضرب عشرة مرات ليعطى القيمة المقاسة، وتقاس المقاومة بوضع مفتاح التحويل على وضع مدى المقاومة . ويوضح الشكل ٨ – ٣٠ مثالاً للدائرة الداخلية لجهاز الاختبار .

ويوصل الجهد السالب إلى الطرف (+) والجهد الموجب إلى الطرف (–) . وهذه الحقيقة يجب مراعاتها عندما يجري تحديد القطبية للثنائيات .



الشكل ٨ – ٣٠ دائرة جهاز قياس المقاومة

عند قياس المقاومة يجب ضبط الوضع صفر للمؤشر، وذلك بعمل دائرة قصر على نهايتى التوصيل ، ثم يتبع ذلك عملية القياس . ومدى قياس المقاومة يتكون من x1 , x100 , x1k . عندما يكون المدى على الوضع x1 ، يبين التدريج قيمة المقاومة ، ويتطلب المدى x100 , x1k ضرب القراءة في 100 , 1000على الترتيب .

٨ – ٧ – ٢ جهاز الاختبار الرقمى Digital tester

يوضح جهاز الاختبار الرقمى الكمية المقاسة في صورة أرقام . وفي الدائرة الداخلية لجهاز الاختبار الرقمي ، يتم تحويل الجهد ، والتيار والمقاومة إلى جهود ثابتة للقياس بواسطة الفولتميتر الرقمي مثلما يحدث في جهاز متعدد القياس الرقمي .

سؤال٨

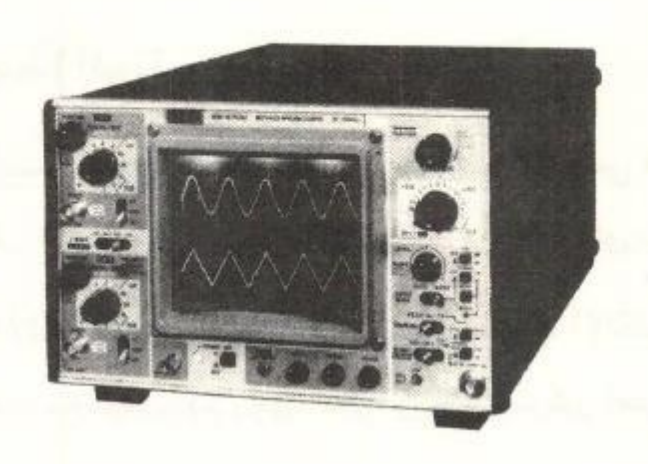
نفرض أن بيان المؤشر في الشكل ٨ – ٢٩ هو لقياس جهد ثابت على المدى DC 2.5.
احسب قيمة الجهد المقاس .

سؤال٩

بفرض أن بيان المؤشر في الشكل ٨ – ٢٩ لقياس المقاومة على المدى x100 ،
احسب قيمة المقاومة المقاسة .

٨ – ٨ راسم الذبذبات CRT oscilloscope

يوضح الشكل ٨ – ٣١ الشكل الظاهرى لراسم ذبذبات ذي أنبوبة أشعة المهبط (CRT) لإظهار شكل الموجات للإشارات الكهربائية ، ويستخدم هذا الجهاز على نطاق كبير لقياس خواص وإصلاح وضبط الأجهزة الإلكترونية.

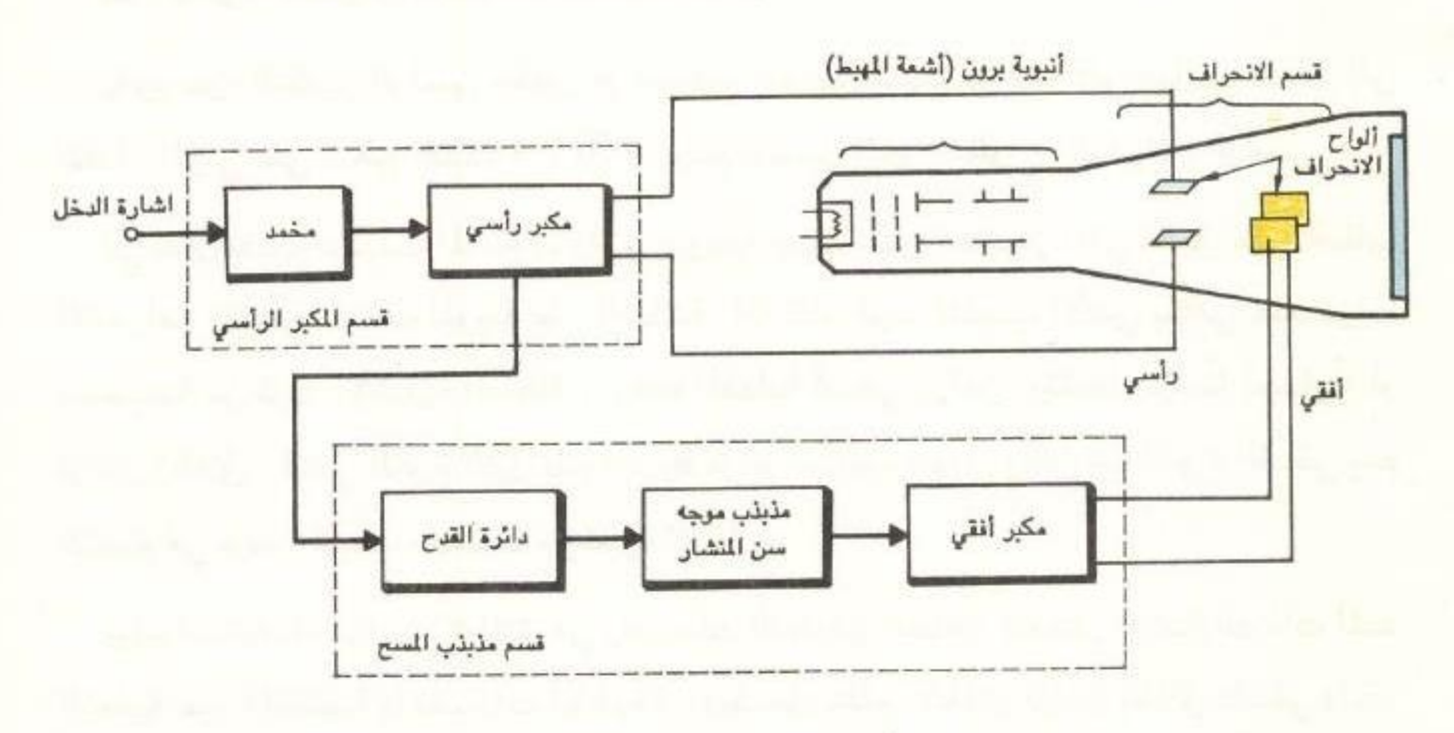


الشكل ٨ – ٣١   راسم ذبذبات CRT

٨ – ٨ – ١ التركيب وفكرة العمل

أ-التركيب

يظهر الشكل ٨ – ٣٢ التركيب الأساسى لراسم ذبذبات ذي أنبوبة أشعة المهبط الذى يستخدم بكثرة في الوقت الحاضر .



الشكل ٨ – ٣٢ التركيب الأساسي لراسم ذبذبات أنبوبة أشعة المهبط (برون)

ب – أنبوبة أشعة المهبط (أنبوبة برون) Braun tube

أنبوبة برون تسمى أيضًا أنبوبة اشعة المهبط (CRT) ، وهى صمام مفرغ يتكون من ثلاثة عناصر ، هي القاذف الإلكتروني، وجزء الانحراف، وشاشة فلورسنت .

حيث يتكون القاذف الإلكترونى من المهبط الذى يقوم بتوليد الإلكترونات وأقطاب التعجيل لتعجيل اندفاع الإلكترونات مع توصيلهم بجهد عالٍ وأقطاب تركيز لعمل شعاع إلكتروني .

وتتكون ألواح الانحراف من زوجين من الأقطاب . حيث يتحرك الشعاع الإلكترونى رأسيا وأفقيا طبقًا للجهد الواقع على أقطاب الانحراف ، وتنجذب الإلكترونات إلى الجهد الموجب وتتنافر مع الجهد السالب ، وتسمى هذه الأقطاب بألواح الانحراف الرأسية والأفقية .

أما الشاشة الفلوروسنت فهى لوح من الزجاج مطلى بمادة فلوروسنتية ، تشع ضوء عند اصطدام الشعاع الإلكترونى بها، وبالتالي تتكون نقطة ضوئية على الشاشة .

هـ – دائرة الانحراف Deflection circuit

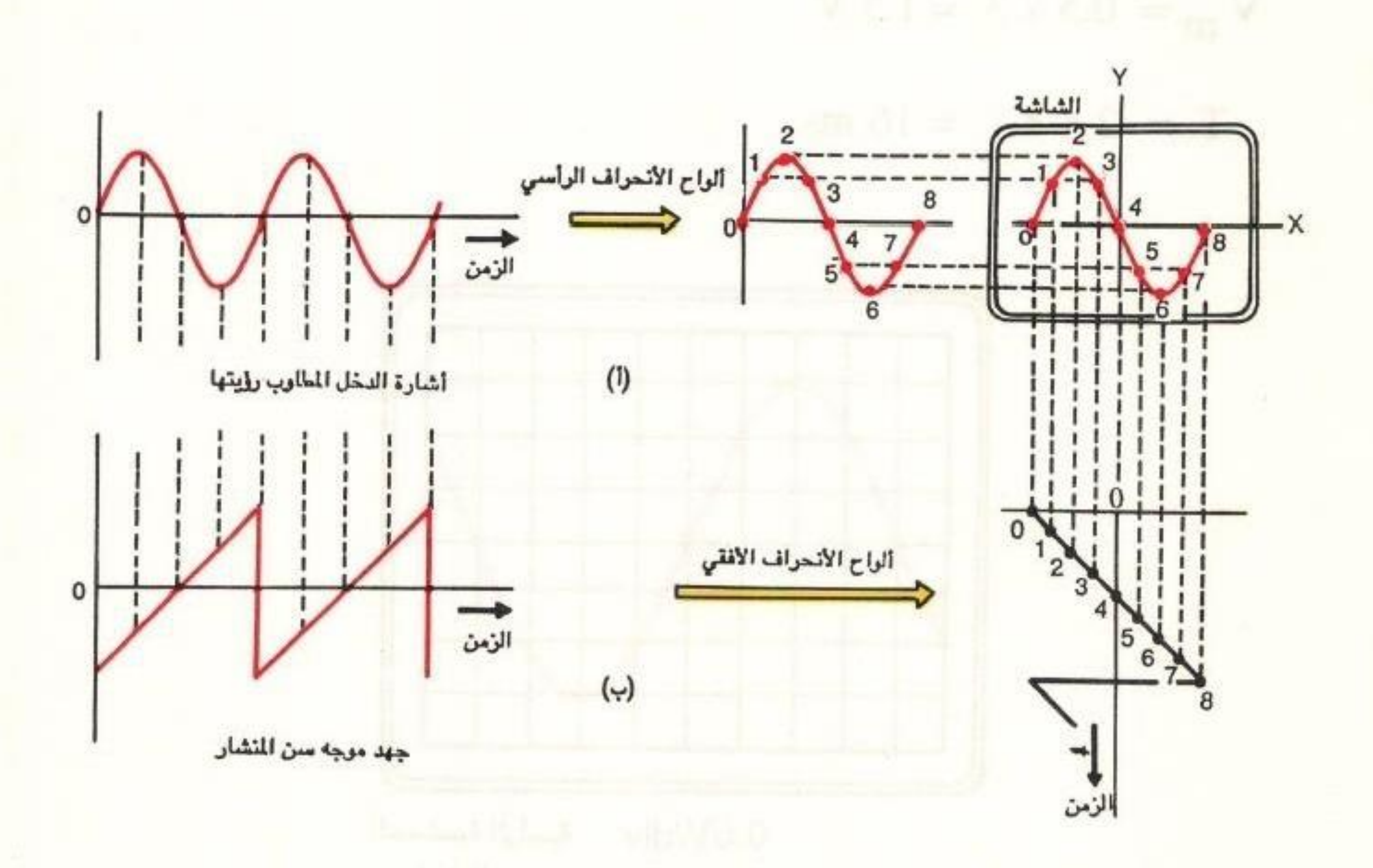
يقوم جزء التكبير الرأسى بتكبير أو تصغير إشارة الجهد الواقعة على نهايتي الدخل إلى المقدار المرئي على سطح الشاشة CRT . ويتم توصيل الخرج بألواح الانحراف الرأسى.

في حين يقوم مذبذب المسح بتوليد موجة جهد سن المنشار التي تطبق على أقطاب الانحراف الأفقية . وتقف الموجة على الشاشة اذا كان تردد المذبذب الأفقى يكافئ عدد مرات صحيحة من تردد الإشارة الداخلة . وهذه العملية تسمى تزامن وتشمل تزامنًا أجباريًا أو تزامن إطلاق . ففي النوع الأول يتم ضبط تردد المذبذب يدويًا، ولكن في النوع الثانى يتم التحكم في تردد المذبذب باستخدام إشارة الدخل .

ويتم استخدام تزامن الإطلاق في راسمات الذبذبات الحالية لإظهار الإشارات ذات المدد الزمنية غير المنتظمة والإشارات المتفرقة ، ويشمل نظام الإطلاق تزامن إطلاق داخلي وآخر خارجي .

د - فكرة العمـــل

كما هو موضح بالشكل ٨ - ٣٣، عند توصيل اشارة جهد على ألواح الانحراف الرأسية وموجة سن المنشار على ألواح الانحراف الأفقية فيكون مكان تقاطعهما هو مسار النقطة . وحيث إن انبوبة CRT لها خاصية اللمعان المستمر لمدة طويلة فإن مسار هذه النقطة يضع خطًا لامعًا لو تحركت هذه النقطة بسرعة كافية .



الشكل ٨ - ٣٣ شكل موجة على سطح شاشة CRT فلوروسنتية

٨ – ٨ – ٢ قياس شكل موجة الإشارة

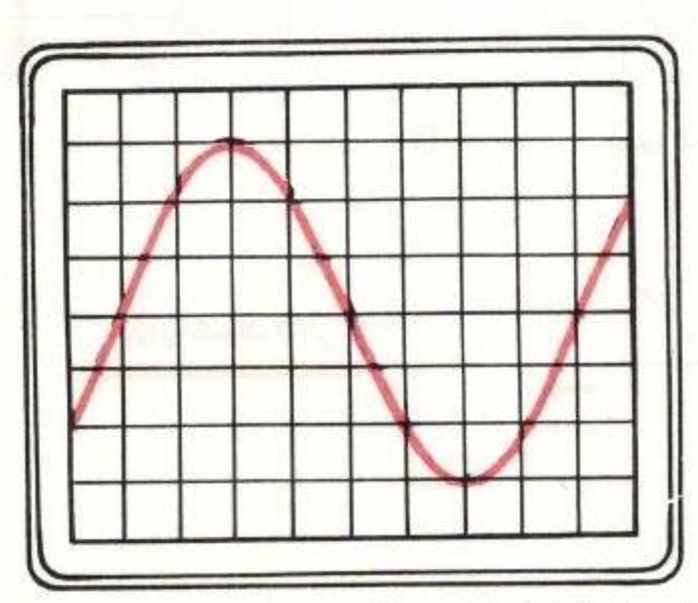
تحسب الحساسية الرأسية بمقدار الجهد [V / div] اللازم لانحراف الشعاع الرأسى تدريج واحد على سطح الشاشة في الاتجاه الرأسي .

وزمن المسح [s / div] يقدر بالزمن اللازم لحركة النقطة في الاتجاه الأفقي تدريج واحد.

عندما يظهر شكل الموجة كما هو مبين بالشكل ٨ – ٣٤ تكون الحساسية الرأسية 0.5 V / div وزمن المسح 2ms / div والمعادلة التالية تعطي اقصى قيمة للجهد V_m والمدة الزمنية T لإشارة الدخل :

$$V_m = 0.5 \times 3 = 1.5\ V$$

$$T = 2 \times 8 = 16\ ms$$



الشكل ٨ – ٣٤ قياس شكل موجة الإشارة

سؤال ١٠

مع فرض أن شكل الموجة بالشكل ٨ – ٣٤ والحساسية الرأسية 2V/ div وزمن المسح 0.5 ms / div ، احسب القيمة القصوى، والقيمة الفعالة، والمدة الزمنية، والتردد لهذه الإشارة .

الحمد لله تعالى الذي تتم بنعمه الصالحات

لقد وفقت بتصوير النسخة اسكنر بصورة جديده وطباعة ممتازة

نسألكم الدعاء بظهر الغيب لي ولوالدي

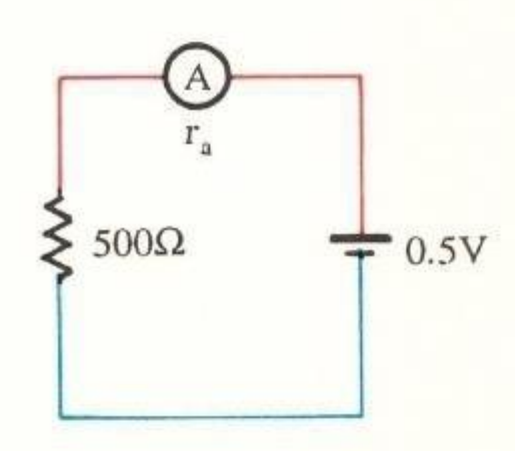
اخوكم في الله أبو عبد الله عبد المهيمن فوزي

تماريـــــن

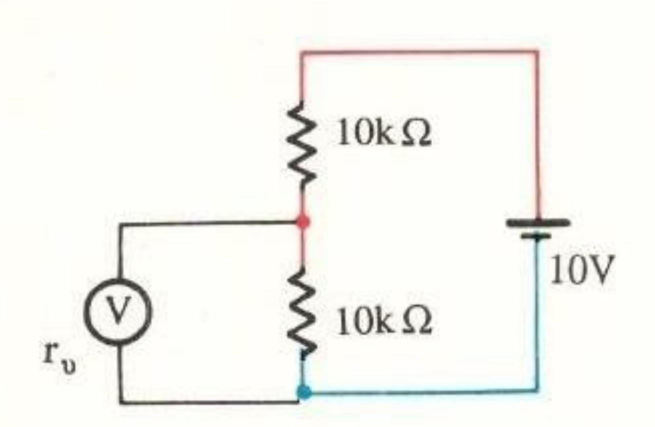
١ – نفترض أن قياس الجهد باستخدام جهاز ڤولتميتر تصنيف 0.5 وله أقصى تدريج 300V ويبين المؤشر 100V . ماهو مدى القيمة الحقيقية ؟

٢ – مع فرض أن المقاومة الداخلية r_a لجهاز أميتر هي $50\ \Omega$ فى الدائرة الموضحة بالشكل ٨ – ٣٥ ، اذكر القيمة المبينة بواسطة الأميتر ثم احسب مقدار الخطأ بالنسبة للحالة قبل توصيل الأميتر .

٣ – مع فرض الدائرة بالشكل ٨ – ٣٦ إذا قيست باستخدام ثلاث ڤولتميترات مقاومتهم الداخلية $10\ k\Omega, 100\ k\Omega\ , 1M\Omega$. حدد القيم المبينة بواسطة الڤولتميترات ثم احسب الأخطاء بالنسبة للحالة قبل التوصيل .



الشكل ٨ – ٣٥



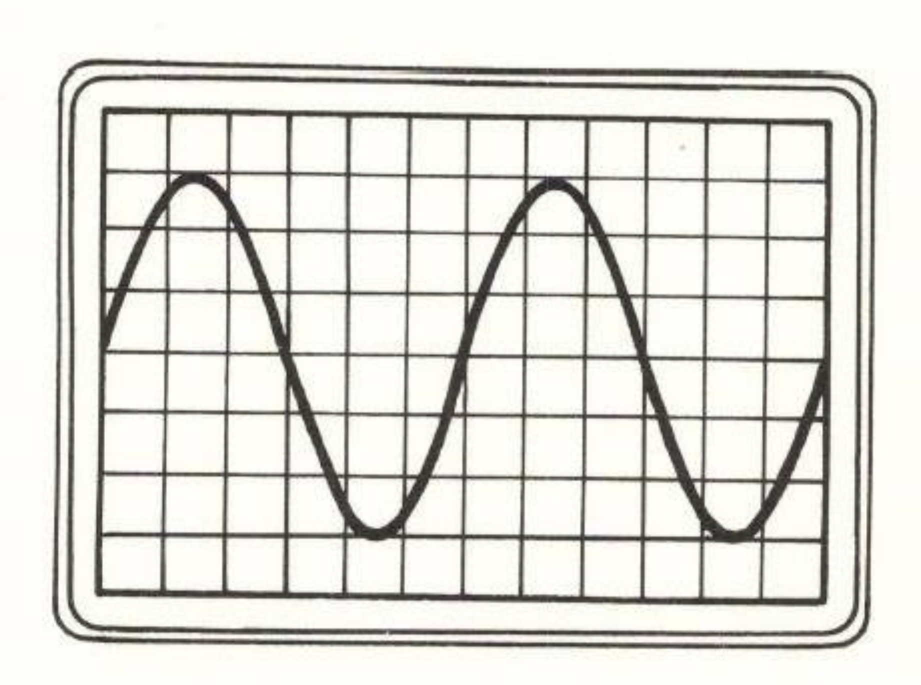
الشكل ٨ – ٣٦

٤ – بفرض أن المقاومة R_x تقاس باستخدام ڤولتميتر له مقاومة داخلية $r_\upsilon = 10k\Omega$ وجهاز أميتر له مقاومة داخلية $r_a = 50\ \Omega$ فى الشكل ٨ – ٢٢ ، احسب الحالات الآتية :

(١) $V = 10\ V\ ,\ I = 2m\ A$ فى الشكل ٨ – ٢٢ (أ)

(٢) $V = 10\ V\ ,\ I = 2m\ A$ فى الشكل ٨ – ٢٢ (ب)

٥ – موجه جيبية موضحة بالشكل ٨ – ٣٧ ظهرت على شاشة راسم الذبذبات عندما سلطت إشارة الدخل بالراسم . احسب القيمة القصوى، والقيمة الفعالة ، والمدة الزمنية ، والتردد لإشارة الدخل عندما تكون الحساسية الرأسية 0.1 V / div وزمن المسح 5µs / div .



الشكل ٨ – ٣٧

الحمد لله تعالى الذي تتم بنعمه الصالحات

لقد وفقت بتصوير النسخة اسكنر بصورة جديده

وطباعة ممتازة

نسألكم الدعاء بظهر الغيب لي ولوالدي

اخوكم في الله أبو عبد الله عبد المهيمن فوزي

ملحق

التفاضل والتكامل

Differentiation and integration

يدرس التفاضل والتكامل ضمن مقررات أخرى. ومع ذلك سوف يساعد هذا الملحق هؤلاء، الذين لم يقوموا بدراسة هذه المقررات .

التفاضل

في حالة تعريف المعادلة $f(x)$ عند النقطة التي يكون عندها $x = a$ ، فإنه يمكن التعبير عن القيمة الخدية كما يلي :

$$\alpha = \lim_{h \to o} \frac{f(a+h) - f(a)}{h}$$

وتسمى α معامل التفاضل للمعادلة $f(x)$ في حالة $x = a$. ويمكن أيضاً التعبير عن α بـ $f'(a)$

ومعامل التفاضل $f'(x)$ هو دالة في x ، ويمكن تعريفه في حدود المنطقة التي توجد فيها $f'(a)$.

وتسمى $f'(x)$ مشتقة $f(x)$ ، وتسمى عملية ايجاد $f'(x)$ بتفاضل $f(x)$.

وإذا كانت Δy هي نسبة الزيادة Δx في x ، وكان $y = f(x)$ ، فإن .

$$\Delta y = f(x + \Delta x) - f(x)$$

ويمكن التعبير عن المشتقة $f'(x)$ للمعادلة $y = f(x)$ كالتالي :

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \to o} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

ويمكن أيضاً التعبير عن مشتقة $y = f(x)$ ، بالإضافة إلى $f'(x)$ كالتالي :

$$y' , \frac{dy}{dx} , \frac{d}{dx} f(x)$$

مثال

$$\frac{d}{dx}(ax+b) = \lim_{\Delta x \to o} \frac{\{a(x+\Delta x)+b\}-(ax+b)}{\Delta x} = a \qquad (1)$$

$$\frac{d}{dx}\sin x = \lim_{\Delta x \to o} \frac{\sin(x+\Delta x)-\sin x}{\Delta x}$$

$$= \lim_{\Delta x \to o} \frac{\cos\left(x+\frac{\Delta x}{2}\right)\sin\frac{\Delta x}{2}^{*}}{\frac{\Delta x}{2}} = \cos x \qquad (2)$$

$$2\cos\alpha\sin\beta = \sin(\alpha+\beta) - \sin(\alpha-\beta)$$

حيث $\alpha = x + \frac{\Delta x}{2}$, $\beta = \frac{\Delta x}{2}$

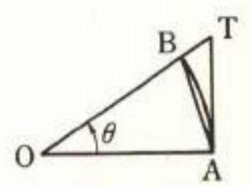
$$\frac{d}{dx}\cos x = \lim_{\Delta x \to o} \frac{\cos(x+\Delta x)-\cos x}{\Delta x}$$

$$= \lim_{\Delta x \to o} \frac{-\sin\left(x+\frac{\Delta x}{2}\right)\sin\frac{\Delta x}{2}^{*}}{\frac{\Delta x}{2}} = \sin x \qquad (3)$$

$$-2\sin\alpha\sin\beta = \cos(\alpha+\beta) - \cos(\alpha-\beta)$$

حيث $\alpha = x + \frac{\Delta x}{2}$, $\beta = \frac{\Delta x}{2}$

* إذا افترضنا أن $o < \theta < \frac{\pi}{2}$ ، فإن الشكل OAB يبين قطاع دائرة مركزها O ونصف قطرها 1 ، حيث T هي نقطة تقاطع المماس عند A مع امتداد OB ويكون من الواضح أن :



$$\Delta OAB < OAB < \Delta OAT$$

$$\therefore \frac{1}{2} \sin\theta < \frac{1}{2}\theta < \frac{1}{2}\tan\theta$$

أي أن

$$\sin\theta < \theta < \tan\theta$$

وعندما تكون $\sin\theta > 0$ ، نقسم كلا الطرفين على $\sin\theta$ ، ونحصل على المقلوب كالتالي :

$$1 > \frac{\sin\theta}{\theta} > \cos\theta$$

وإذا اعتبرنا أن θ هي 0 ، فإن $\cos\theta$ تصبح 1 .

وكذلك $\frac{\sin\theta}{\theta}$ تصبح 1 :

وإذا اعتبرنا أن $\theta = \frac{\Delta x}{2}$ ، وأن $\theta \to 0$ ، فإن $\Delta x \to 0$. وعليه يكون :

$$\lim_{\Delta x \to o} \frac{\sin\frac{\Delta x}{2}}{\frac{\Delta x}{2}} = 1$$

مثال

$$\frac{d}{dx}\log_a x = \lim_{\Delta x\to o}\frac{\log_a(x+\Delta x)-\log_a x}{\Delta x}$$

$$= \lim_{\Delta x\to o}\frac{1}{\Delta x}\log_a\left(1+\frac{\Delta x}{x}\right)$$

$$= \frac{1}{x}\lim_{\Delta x\to o}\frac{x}{\Delta x}\log_a\left(1+\frac{\Delta x}{x}\right)$$

$$= \frac{1}{x}\lim_{\Delta x\to o}\log_a\left(1+\frac{\Delta x}{x}\right)^{\frac{x}{\Delta x}} \; {**}$$

$$= \frac{1}{x}\log_a \in \; = \; \frac{1}{x\log_{\in} a} \qquad (4)$$

** القيمة الحدية لـ $\lim_{h\to o}(1+h)^{\frac{1}{h}}$

وفيما يلي نتيجة حساب .... , $h = 0.1 \;,\; 0.01 \;,\; 0.001$

وكذلك .... , $h = -0.1 \,,\, -0.01 \,,\, -0.001$ ،

وأيضا $(1+h)^{\frac{1}{h}}$

h	$(1+h)^{\frac{1}{h}}$	h	$(1+h)^{\frac{1}{h}}$
0.1	2.593742......	- 0.1	2.867971.....
0.01	2.704813......	-0.01	2.731999.....
0.001	2.716923......	-0.001	2.719642.....
0.0001	2.718145......	-0.0001	2.718417.....

وإذا افترضنا أن ∈ هي القيمة الحدية لـ $\lim_{h \to o} (1 + h)^{\frac{1}{h}}$

يمكن التعبير عن هذه القيمة الحدية كالتالي : $\in = \lim_{h \to o} (1 + h)^{\frac{1}{h}}$

حيث ∈ هي عدد غير منطقي ، وتكون القيمة 2.718281

وفي حالة $h = \frac{\Delta x}{x} \quad , \quad h \to o$

فإن $\Delta x \to o \ (x \neq o)$

وعليه فإن $\lim_{\Delta x \to o} \left(1 + \frac{\Delta x}{x}\right)^{\frac{x}{\Delta x}} = \in$

تفاضل الدوال العكسية Inverse Functions

هنا سنقوم بالحصول على تفاضل الدالة العكسية g(x) من f(x)، في حالة $y = g(x)$ ، وعليه $x = f(y)$.

عند إجراء تفاضل للطرفين يصبح الطرف الأيمن كالتالي :

$$\frac{d}{dx} f(y) = \frac{d}{dy} f(y) \cdot \frac{dy}{dx} = f'(y) \frac{dy}{dx}$$

$$1 = f'(y) \frac{dy}{dx}$$

وعليه : $\frac{dy}{dx} = \frac{1}{f'(y)} = \frac{1}{\frac{dx}{dy}}$

حيث : $\frac{dx}{dy} \neq o$

أو $\frac{dy}{dx} = g'(x) = \frac{1}{f'(g(x))}$

مثال

عندما تكون $y = a^x$ فإن $x = \log_a y \ , \frac{dx}{dy} = \frac{1}{y \log_\in a}$

وعليه فإن :

$$\frac{d}{dx} a^x = y \log_\in a = a^x \log_\in a \qquad (5)$$

وفي حالة $a = \in$ فإن :

$$\frac{d}{dx} \in^x = \in^x \log_\in \in = \in^x \qquad (6)$$

تفاضل المعادلات الهجينة (المختلطة) Hybrid equations

إذا كان من الممكن إجراء تفاضل لـ $u = g(x)$، $y = f(u)$ وكانت Δx هي الزيادة في x ، Δu هي الزيادة في u ، Δy هي الزيادة في y ، فإن :

$$\Delta u = g(x + \Delta x) - g(x)$$
$$\Delta y = f(g(x + \Delta x)) - f(g(x)) = f(u + \Delta u) - f(u)$$

وعندما $\Delta x \rightarrow o$ فإن $\Delta u \rightarrow o$ ، ويكون :

$$\lim_{\Delta x \rightarrow o} \frac{\Delta y}{\Delta u} = \lim_{\Delta u \rightarrow o} \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{dy}{du}$$

وعليه فإن

$$\frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow o} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow o} \frac{\Delta y}{\Delta u} \frac{\Delta u}{\Delta x} = \lim_{\Delta u \rightarrow o} \frac{\Delta y}{\Delta u} \cdot \lim_{\Delta x \rightarrow o} \frac{\Delta u}{\Delta x}$$

$$= \frac{dy}{du} \cdot \frac{du}{dx}$$

مثال

عندما تكون $\omega t = u$

فمن المعادلة (1) فإن $\frac{du}{dt} = \omega$

وعليه فإن :

$$\frac{d}{dt} \sin \omega t = \omega \cos \omega t \qquad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \cos \omega t = \omega \, (-\sin \omega t) = -\omega \sin \omega t \qquad (8)$$

وفي حالة $\frac{du}{dt} = k$, $kt = u$ فإن

$$\frac{d}{dt} \in^{kt} = k \in^{kt} \qquad (9)$$

التكامل

على التباين من$f(x)$ ، إذا كان $F'(x) = f(x)$ ، فإننا نسمى المعادلة $F(x)$ بالتكامل غير المحدَّد ·

وإذا أمـكن إيجـاد التكامـل غـيـر المحـــدد $F(x)$ لـ $f(x)$ ، يمكـن التـعـبـيـر عنـه كالتـــالي : $\int f(x)\ dx$

وعندما يكون $F(x)$ هو التكامل غير المحدد لـ $f(x)$ ، يكون التكامل غير المحدد هو

$$\int f(x)\ dx = F(x) + C$$

حيث C هو ثابت التكامل ·

وعندما نحصل على نتيجة من التكامل غير المحدد لـ $f(x)$ ، فإن ذلك يسمى بالتكامل ·

مثال

من المعادلات (7) , (8) , (9)

$$\int \sin\ \omega t\ dt = -\frac{1}{\omega} \cos\ \omega t + C \qquad (10)$$

$$\int \cos\ \omega t\ dt = \frac{1}{\omega} \sin\ \omega t + C \qquad (11)$$

$$\int \epsilon^{kt}\ dt = \frac{1}{k} \epsilon^{kt} + C \qquad (12)$$

وفي حالة $\cos 2\alpha = 1 - 2\sin^2\alpha$

و $\sin^2\alpha = \frac{1-\cos 2\alpha}{2}$

و $\alpha = \omega t$

من المعادلة (1) يكون $\frac{d}{dt} t = 1$

ومن المعادلة (7) يكون $2\omega t = u$ وعليه يكون $\frac{du}{dt} = 2\omega$

ويكون $\frac{d}{dt}\sin 2\omega t = 2\omega\cos 2\omega t$

وعليه فإن

$$\int \sin^2 \omega t \, dt = \int \frac{1-\cos 2\omega t}{2} dt = \frac{1}{2}\int dt - \frac{1}{2}\int \cos 2\omega t \, dt$$

$$= \frac{1}{2}t - \frac{1}{4\omega}\sin 2\omega t + C \qquad (13)$$

وإذا كانت $F(x)$ هي تكامل غير محدد لـ $f(x)$ ، فإن :

$$\int_a^b f(x)\,dx = F(b) - F(a)$$

ويسمى هذا بالتكامل المحدد لـ $f(x)$ من a إلى b .

مثال للتكامل المحدد

$$\int_0^T \sin^2 \omega t \, dt = \frac{1}{2}(T-0) - \frac{1}{4\omega}(\sin 2\omega t - \sin 0) = \frac{1}{2}T \qquad (14)$$

ملحق
المصطلحات الفنية

A

absolute value	القيمة المطلقة
active	فعال
actuator	المحث (المحفز)
A-D converter	المحول التمثيلي / الرقمي
admittance	السماحية
allowable	مسموح به
alkali (alkaline)	قلوي
alternating current (AC)	تيار متغير (مترددد)
ammeter	اميتر (مقياس التيار)
ampere	امبير
amplification	تكبير
amplifier	مكبر
analogue tester	جهاز الاختبار التمثيلي
angular velocity	السرعة الزاوية
anode	أنود – مصعد
apparent	ظاهري

Arago's disk	قرص أراجو
argument	ازاحة زاوية
atom	ذرة
attraction	جذب
autotransformer	المحول الذاتي
avo - meter	افوميتر

B

back coupling	ازدواج خلفي
battery	بطارية
bimetal	معدن مزدوج
binary number	عدد ثنائي
biopolar	ثنائي القطب
Biot - Savart's law	قانون بيوت ساڤارت
bridge circuit	دائرة القنطرة
Braun tube	أنبوبة برون

C

capacitor	مكثف
capacity	سعة

cathode	كاثود – مهبط
cell	خلية
characteristic	خاصية
charging current	تيار الشحن
coating	طلاء
coil	ملف
collector	مجمع
computer	حاسوب
control	تحكم
core	قلب الملف
Coulomb's law	قانون كولوم
complex	مركب
complex numbers	الأعداد المركبة
conductivity	التوصيلية النوعية
conductor	موصل
connection	توصيل
contact	تلامس
conversion	تحويل
corona discharge	التفريغ التاجي
correction	تصحيح

counter عداد

CPU (central processing unit) وحدة المعالجة المركزية

CRT وحدة العرض (الشاشة) - صمام اشعة المهبط

crystal بلورة

current تيار

cylindrical اسطواني

D

D-A converter المحول الرقمي / التمثيلي

DC circuits (Direct current) دوائر التيار المستمر

deflection انحراف

degree درجة

density كثافة

differential circuit دائرة تفاضلية

differentiation التفاضل

digital meter جهاز القياس الرقمي

digital tester جهاز الاختبار الرقمي

direct current تيار مستمر

diode ثنائي

discharge التفريغ

distortion تشويه

E

earth magnetism	المغناطيسية الأرضية
eddy current	التيار الدوامي
effective	فعال
electrification	التكهرب
electrolytic solution	محلول الكتروليتي
electromotive force	القوة الدافعة الكهربائية
electron	الكترون
electronic circuit	دائرة الكترونية
electrostatic	كهروستاتيكي
energy	طاقة
equivalent circuit	دائرة مكافئة
error	خطأ

F

factor	معامل
Faraday's law	قانون فارادي
feedback	التغذية الراجعة
field	مجال
field effect transistor (FET)	ترانزستور تأثير المجال

Fleming's left hand rule	قاعدة اليد اليسرى لفلمنج
Fleming's right hand rule	قاعدة اليد اليمنى لفلمنج
fluorescent lamp	مصباح فلوروسنت
flux	فيض
force	قوة
forward voltage	جهد أمامي
frequency	التردد
frictional electricty	كهرباء الاحتكاك
fuel cell	الخلية التي تعمل بالوقود
full - adding circuit	دائرة الجمع الكلي
full wave	موجة كاملة

G

gain	الكسب
galvanometer	جلفانومتر
generator	مولد
grounding	أرضي (الطرف الأرضي)

H

half - adding circuit	دائرة الجمع النصفي

half wave	نصف موجة
Hall device	جهاز هول
harmonic	توافقية – توافقي
heat	حرارة
hexadecimal numbers	اعداد ستعشرية
h - parameter	معامل h
hybrid equations	المعادلات الهجينة (المختلطة)
hysteresis loop	حلقة التخلف المغناطيسي (الهسترسيس)

I

imaginary	تخيلي
impurity	شائبة
indicating instruments	أجهزة البيان
inductance	محاثة
induction	حث
instantaneous	لحظي
insulation	عزل
integrated circuit (IC)	الدائرة المتكاملة
integration	التكامل
intensity	شدة – قوة

interface	نظام المواجهة
intrinsic	ذاتي
inverse functions	الدوال العكسية
ion	ايون

J

JIS (Japanese Industrial Standards)	المواصفات الصناعية اليابانية
Joule	چول

K

Kirchoff's first law	القانون الأول لكيرشوف

L

leakage transformer	محول التسرب
Lenz's law	قانون لنز
light emission	باعث للضوء
limit switch	مفتاح الحد
load	الحمل
logic circuit	دائرة منطقية
LSI (large scale integrated circuits)	الدوائر المتكاملة كبيرة المدى

M

magnet	مغناطيس
magnetism	مغناطيسية
magnetomotive force	القوة الدافعة المغناطيسية
measuring instruments	أجهزة قياس
meter	جهاز قياس
mistake	خطأ
motor	محرك
moving - coil type	ذو الملف المتحرك
multi - stage	متعدد المراحل
mutual induction	الحث المتبادل

N

non - sinusoidal	غير جيبي

O

Ohm's law	قانون أوم
operational amplifier	مكبر التشغيل
oscillation	ذبذبة

oscilloscope	راسم الذبذبات

P

parallel connection	توصيل على التوازي
Peltier effect	تأثير بلتيير
period	زمن الدورة (مدة)
permeability	نفاذية
phase	الطور – الوجه
phenomenon	ظاهرة
photoconductive cell	خلية ضوئية موصلة
phototransistor	الترانزستور الضوئي
plane	مستوى
pointer - type	ذو مؤشر متحرك
polar co-ordinates	الأحداثيات القطبية
pole	قطب
potential difference	فرق الجهد
power	قدرة
precipitation	ترسيب
precision	دقة
pressure	ضغط

pulse motor	محرك نبضي

Q

quantity	كمية
quotient - meter type	جهاز قياس من النوع المقسوم

R

RAM (random access memory)	ذاكرة الوصول العشوائي
rectangular co-ordinates	الاحداثيات المتعامدة
rectifier	مقوم
rectifying circuit	دائرة تقويم
regulator	منظم
relative permeability	السماحية النسبية
relay	مرحل
reluctance	ممانعة (مقاومة)
resistance	مقاومة
resistivity	المقاومة النوعية
resistor	مقاوم
resonance	رنين
reverse voltage	جهد عكسي

revolving	دوار
robot	الإنسان الآلي
ROM (read only memory)	ذاكرة القراءة فقط

S

Seebeck effect	تأثير سيبك
self induction	حث ذاتي
semiconductor	شبه موصل
sensitivity	حساسية
sensor	جهاز إحساس (مجس)
sequencer	المعالج المتتابع
sequential control	التحكم المتتابع
series connection	توصيل على التوالي
servomotor	محرك السيرڤو
shield	حاجب
signal level	مستوى الإشارة
sinusoidal wave	موجة جيبية
smoothing circuit	دائرة تنعيم
solar cell	الخلية الشمسية
solenoid	سولينويد (ملف لولبي)

spark discharge	تفريغ الشرارة
spot welding	لحام النقطة
square wave	الموجة المربعة
static	ساكن
strength	شدة – قوة
super conductivity	التوصيلية الفائقة
symbol	رمز
synchronous speed	السرعة المتزامنة
system	نظام

T

temperature	درجة الحرارة
thermo - ammeter	الأميتر الحراري
thermocouple	ازدواج حراري
thermoelectric	كهروحراري
thermometer	ترمومتر
three phase AC	التيار المتغير ثلاثي الأوجه
thyristor	ثايرستور (مقاومة حرارية)
transformer	محول (ترانسفورمر)
transient	عابر

transistor	ترانزستور
truth tablė	جدول القيم المنطقية
tuned	متوالف

U

unit	وحدة

V

vacuum discharge	التفريغ في الفراغ
valence	تكافؤ
variable	متغير
vector	متجه
vibrating reed	ريشة هزازة (رنانة)
volt	فولت
voltaic cell	الخلية الفولتية
voltage	جهد
voltmeter	مقياس الجهد

W

watt	وات

wattmeter	مقياس القدرة
waveform	شكل موجي
Wheatstone bridge	قنطرة هويتستون

الحمد لله تعالى الذي تتم بنعمه الصالحات

لقد وفقت بتصوير النسخة اسكنر بصورة جديده

وطباعة ممتازة

نسألكم الدعاء بظهر الغيب لي ولوالدي

اخوكم في الله أبو عبد الله عبد المهيمن فوزي





الفرزدق للدعاية والإعلان
تلفون ٤٧٧٣٢٩٤٤